

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO
VERTICAL DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO CON
DISTINTOS CONTROLADORES DE LÓGICA DIFUSA**

Autor:

D. Guillermo Martin-Lorente Velasco

Tutor:

D. Rubén Oliva Domínguez

Cotutora:

Dra. Dña. María Jesús López Boada

Leganés, Septiembre 2015.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por apoyarme en todo momento y animarme a continuar con mis estudios.

A mi hermana, que ha sido un ejemplo a seguir en mi vida.

A Andrea, por soportarme en época de exámenes y apoyarme en los momentos difíciles.

A mis amigos y amigas, tanto de Getafe como de La Estrella, que siempre han estado ahí para sacarme una sonrisa cuando más la necesitaba.

A mis compañeros de la Universidad, que al final se convirtieron en amigos, que han sido un gran apoyo a lo largo de estos cuatro años.

Por último, a mi tutor D. Rubén Oliva y a la Dra. Dña. María Jesús López Boada que siempre han estado ahí para resolverme todo tipo de dudas y se han preocupado en todo momento porque todo salga bien.

RESUMEN

El objetivo de este Trabajo es el diseño de distintos controladores mediante lógica borrosa para usarlos en el estudio del comportamiento dinámico vertical de un vehículo ferroviario y, así, poder mejorar progresivamente las suspensiones de los vehículos, para que sean más seguros y confortables.

Los modelos de los controladores han sido construidos en el software Matlab, más concretamente en una aplicación de este software llamada Simulink.

Para realizar las simulaciones se utiliza un vehículo ferroviario diseñado y construido en el software Simpack Rail.

ABSTRACT

The objective of this work is to design different drivers using fuzzy logic for use in the study of the vertical dynamic behavior of a railway vehicle and progressively improve the suspensions of vehicles, to be more safe and comfortable.

Drivers models have been built in the Matlab software, specifically in the software application called Simulink.

To perform simulations a railway vehicle designed and built in software is used Simpack Rail.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estructura del proyecto.....	2
Capítulo 2. Material Rodante.....	5
2.1. Material motor.....	6
2.1.1. Material tractor.....	6
2.1.2. Material automotor.....	9
2.1.3. Material auxiliar.....	9
2.2. Material remolcado.....	10
2.2.1. Coche.....	10
2.2.2. Furgón.....	10
2.2.3. Vagón.....	10
2.3. Elementos del vehículo ferroviario.....	11
2.3.1. Caja.....	11
2.3.2. Bastidor.....	11
2.3.3. Larguero.....	11
2.3.4. Traviesas extremas o cabeceros.....	11
2.3.5. Reductores.....	12
2.3.6. Peso suspendido y no suspendido.....	12
2.3.7. Aparatos de tracción y choque.....	12
2.3.8. Canalizaciones.....	12
2.4. Elementos de rodadura.....	13
2.4.1. Eje.....	13
2.4.2. Bogie.....	13
2.4.3. Rodamientos.....	14
2.4.4. Caja de grasa.....	14
2.4.5. Ruedas.....	15
2.4.6. Placas de guarda.....	16
2.5. Suspensión de un vehículo ferroviario.....	17
2.5.1. Elementos elásticos.....	18
2.5.2. Elementos amortiguadores.....	21
Capítulo 3. Modelado de un vehículo ferroviario.....	27
3.1. Software Simpack.....	27

3.2. Construcción del modelo.....	28
3.2.1. Creación juego de ruedas.....	29
3.2.2. Creación de bogie.....	30
3.2.3. Creación del cabezal fijo.....	33
3.2.4. Creación de la suspensión primaria.....	34
3.2.5. Creación de la suspensión secundaria.....	36
3.2.6. Creación vehículo ferroviario.....	41
Capítulo 4. Control Borroso.....	47
4.1. Introducción.....	47
4.2. Lógica borrosa.....	48
4.3. Interacción entre Simpack y Simulink.....	48
4.3.1. Generación de un modelo en Simulink.....	49
4.3.2. Generar un archivo DLL del modelo.....	51
4.3.3. Introducir el archivo DLL en la base de datos del modelo en Simpack...51	
4.3.4. Crear un sensor para usarlo de entrada en el modelo de Simulink.....	52
4.3.5. Crear un controlador para obtener la salida del modelo de Simulink.....	53
4.3.6. Generar expresiones en Simpack.....	54
4.3.7. Generar fuerzas en Simpack.....	55
4.3.8. Irregularidades de la vía.....	55
Capítulo 5. Simulaciones.....	59
5.1. Controlador 1.....	59
5.1.1. Resultados.....	61
5.2. Controlador 2.....	64
5.2.1. Resultados.....	66
Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros.....	69
6.1. Conclusiones.....	69
6.2. Trabajos futuros.....	70
Bibliografía.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Clasificación de vehículos de tracción.....	6
Figura 2.2. Clasificación vehículos diesel.....	7
Figura 2.3. Locomotora diésel de transmisión hidráulica "Renfe 354".....	7
Figura 2.4. Clasificación vehículos de tracción eléctrica.....	8
Figura 2.5. Locomotora de tracción eléctrica "Renfe 269".....	8
Figura 2.6. Serie 464 "Civia" y serie 447 de Renfe.....	9
Figura 2.7. Vagón tolva.....	10
Figura 2.8. Bastidor de un vehículo ferroviario.....	11
Figura 2.9. Reductores de velocidad de un vehículo ferroviario.....	12
Figura 2.10. Eje de un vehículo ferroviario.....	13
Figura 2.11. Barras de tracción de un bogie.....	14
Figura 2.12. Caja de grasa.....	15
Figura 2.13. Rueda ferroviaria.....	15
Figura 2.14. Conicidad de las ruedas de un vehículo ferroviario.....	16
Figura 2.15. Placa de guarda.....	16
Figura 2.16. Localización de suspensión primaria y secundaria.....	18
Figura 2.17. Partes de una ballesta.....	19
Figura 2.18. Suspensión con muelles helicoidales.....	19
Figura 2.19. Suspensión neumática.....	20
Figura 2.20. Comparación amortiguador monotubo y bitubo.....	23
Figura 2.21. Suspensiones pasiva.....	23
Figura 2.22 Suspensión semi-activa.....	24
Figura 2.23 Suspensión activa.....	25
Figura 3.1. Juego de ruedas.....	29
Figura 3.2. Juegos de ruedas colocados.....	30
Figura 3.3. Primitiva "\$P_bogie_frame".....	31
Figura 3.4. Primitiva "\$P_bogie_frame_cubo".....	32
Figura 3.5. Bogie finalizado.....	32
Figura 3.6. Modelado del muelle de la suspensión.....	34
Figura 3.7. Modelado del amortiguador de la suspensión.....	35

Figura 3.8. Introducción de la función para el comportamiento de la suspensión vertical.....	36
Figura 3.9. Modelado del muelle de la suspensión secundaria.....	37
Figura 3.10. Modelado del amortiguador de la suspensión secundaria.....	38
Figura 3.11. Introducción de la función que determina el comportamiento del amortiguador.....	38
Figura 3.12. Modelado de la barra antitorsión.....	39
Figura 3.13. Modelado del BumpStop.....	40
Figura 3.14.a Colocación bogie trasero.....	41
Figura 3.14.b Colocación bogie trasero.....	41
Figura 3.15. Propiedades "\$B_wagon".....	42
Figura 3.16. Valores "\$B_wagon".....	43
Figura 3.17. Valores "\$B_wagon".....	44
Figura 3.18. Display de la primitiva.....	44
Figura 3.19. Cambio de posición del "wagon".....	45
Figura 3.20. Vehículo ferroviario final.....	46
Figura 4.1. Modelo en Simulink.....	49
Figura 4.2. Controlador Borroso.....	50
Figura 4.3. Pantalla generación de un archivo DLL.....	51
Figura 4.4. Carpeta donde se pegan los archivos DLL del modelo.....	52
Figura 4.5. Pantalla de configuración de un sensor.....	53
Figura 4.6. Pantalla configuración de un controlador.....	53
Figura 4.7. Controladores y sensores creados para el modelo.....	54
Figura 4.8. Pantalla configuración de expresiones.....	54
Figura 4.9. Pantalla configuración de fuerzas.....	55
Figura 4.10. Excitación del vehículo ferroviario.....	56
Figura 4.11. Irregularidad en la vía.....	57
Figura 5.1. Modelo controlador 1 en Simulink.....	60
Figura 5.2. Comparación de la fuerza vertical ejercida por el amortiguador trasero izquierdo con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 1.....	61
Figura 5.3. Comparación de la fuerza vertical ejercida por el amortiguador delantero izquierdo con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 1.....	62

Figura 5.4. Comparación de la aceleración vertical ejercida por el amortiguador trasero izquierdo con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 1.....	63
Figura 5.5. Comparación de la aceleración vertical ejercida por el amortiguador delantero izquierdo con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 1.....	63
Figura 5.6. Modelo de Controlador 2 en Simulink.....	64
Figura 5.7. Colocación de las variables lingüísticas del controlador 2.....	65
Figura 5.8. Comparación de la fuerza vertical ejercida por el amortiguador trasero derecho con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 2.....	66
Figura 5.9. Comparación de la fuerza vertical ejercida por el amortiguador delantero izquierdo con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el Controlador 2.....	67
Figura 5.10. Comparación de la aceleración vertical ejercida por el amortiguador trasero derecho con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 2.....	68
Figura 5.11. Comparación de la aceleración vertical ejercida por el amortiguador delantero derecho con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 2.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Componentes de las suspensiones.....	17
Tabla 3.1. Marcadores para la colocación de la suspensión primaria.....	29
Tabla 3.2. Posición de los juegos de ruedas.....	30
Tabla 3.3. Marcadores para conectar bogie con la suspensión del vehículo.....	33
Tabla 3.4. Marcadores para conectar el cabezal fijo a la suspensión.....	34
Tabla 3.5. Marcadores para unir el "wagon" a los bogies.....	45
Tabla 5.1. Reglas controlador borroso 1.....	60
Tabla 5.2. Reglas controlador borroso 2.....	65

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

En la actualidad, el transporte ferroviario se enfrenta a un reto de gran magnitud. Por un lado, debe responder a las necesidades crecientes de movilidad de los ciudadanos y, por otro, debe ofrecer una alternativa válida a las demás modalidades de transporte en una situación caracterizada por el incremento de los precios del petróleo y por la preocupación cada vez mayor respecto a los efectos del transporte en el medio ambiente.

Para poder hacer frente a esos desafíos, es preciso que el ferrocarril sea cada vez más eficaz.

El tren es un medio de transporte que se caracteriza por su rentabilidad debido a su bajo coeficiente de resistencia a la rodadura. Es este uno de los motivos por el que se debe fomentar su uso y, por tanto, invertir en él para un desarrollo

continuo en el que se consigan mejoras, siempre conservando la seguridad y el confort de los pasajeros o las mercancías que transporte [1].

Una de las mejoras que se está investigando y desarrollando en la actualidad, es el aumento de la velocidad de los vehículos ferroviarios. En Japón, el Maglev ha alcanzado los 603.5 kilómetros por hora este año 2015, en un viaje de prueba estableciendo el record de velocidad de un vehículo ferroviario [12].

Para conseguir estas velocidades tan altas con una seguridad y un confort adecuados se debe hacer un control muy preciso de todas las variables de las que depende un vehículo ferroviario. Es por este motivo, por el cual existen investigaciones y estudios que intentan mejorar todos los campos del vehículo ferroviario como puede ser: suspensiones, aerodinámica, tracción, frenada, rodadura, etc.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo es realizar un diseño correcto de un controlador borroso para obtener conclusiones en su uso en una suspensión secundaria vertical de un vehículo ferroviario.

Se quieren obtener resultados que demuestren que una suspensión pasiva de un vehículo da peores resultados de confort y seguridad que una suspensión activa.

Con los controladores que se construyen en Simpack, se obtienen resultados de aceleración vertical del vehículo y de fuerza que se ejerce en los amortiguadores. Con estos resultados, se obtiene el controlador que es más conveniente usar para el buen funcionamiento de la suspensión del vehículo para asegurar la mayor seguridad y el mayor confort posible.

1.3. Estructura del trabajo

El trabajo consta de 6 capítulos, incluido dicho capítulo. A continuación, se explica brevemente de lo que consta cada capítulo.

En el capítulo 2, se describen los distintos tipos de vehículos ferroviarios que hay. Por otro lado, se explican los elementos que forman un bogie, las partes de una suspensión y la distinción entre suspensión pasiva, semiactiva y activa.

En el capítulo 3, se explican los pasos que hay que llevar a cabo para construir un vehículo ferroviario en el software Simpack Rail.

En el capítulo 4, se hace una introducción a la lógica borrosa y se describen los pasos que hay que seguir para construir un controlador e introducirlo en el vehículo ferroviario para realizar las simulaciones.

En el capítulo 5, se desarrollan distintos tipos de controladores y se realizan las simulaciones necesarias de las que obtendremos resultados.

En el capítulo 6 se dan conclusiones y trabajos futuros.

CAPÍTULO 2. MATERIAL RODANTE

Se conoce como **material rodante** a todos los tipos de vehículos que son capaces de circular por líneas ferroviarias. Se pueden usar distintos tipos de clasificaciones para enumerarlos. En este Trabajo, se usa la clasificación más usada que es según su capacidad tractora y su uso comercial [2].

Los elementos rodantes son los sistemas que generan un movimiento seguro para el vehículo a lo largo de la vía ferroviaria. Sus funciones principales son las siguientes [3].

- Transmitir la carga vertical desde las ruedas del vehículo a los raíles.
- Guiar el vehículo a lo largo de la vía.
- Controlar las fuerzas dinámicas debidas al movimiento generado en las irregularidades de la vía, curvas, cambios de aguja y tras los impactos entre los propios vagones.
- Amortiguar de manera eficiente.
- Aplicar las fuerzas de tracción y frenado.

2.1. Material motor

Vehículos con motor para su autopropulsión y para la tracción del material rodante. Se clasifican en material tractor, vehículo automotor y material auxiliar [4].

2.1.1. Material tractor

Vehículos provistos de motor, para remolcar otro material ferroviario aunque no llevan carga útil en el mismo. En la figura 2.1, se muestra la clasificación de los distintos tipos de vehículos tractores que hay según el tipo de recurso que utilizan para su propulsión.

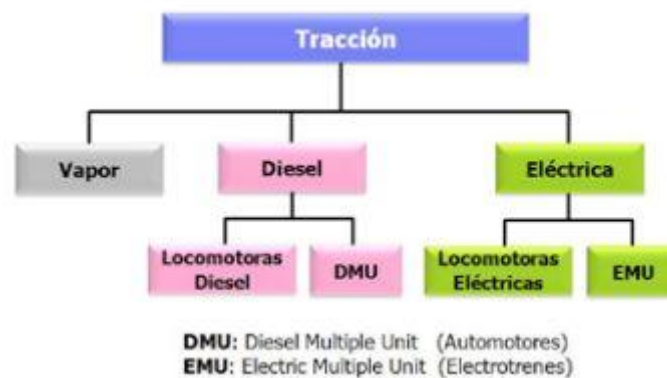


Figura 2.1. Clasificación de vehículos de tracción [4]

a) Tracción a vapor

Este tipo de material dispone de una caldera donde se calienta agua quemando madera, carbón o fuel para proporcionar la energía suficiente para impulsar la locomotora. Hay distintas locomotoras de vapor:

- Locomotora más tender: locomotora que arrastra un vagón cargado de agua y carbón para su abastecimiento.
- Locomotora menos tender: locomotora que lleva un compartimiento detrás de la cabina donde almacena el combustible para la generación de energía.

b) Tracción Diésel

Los vehículos de tracción diésel se pueden clasificar como se indica en la figura 2.2, un ejemplo de vehículo de tracción diésel se observa en la figura 2.3.

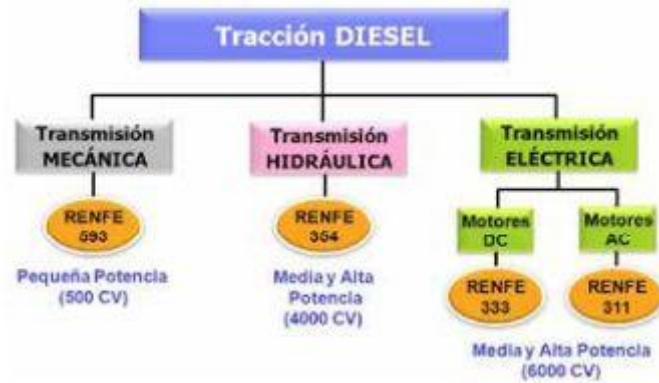


Figura 2.2. Clasificación vehículos diésel [4]

- *Transmisión mecánica*: se compone de una transmisión mecánica con embrague y caja de cambios.
- *Transmisión hidráulica*: tiene una transmisión hidráulica entre el par motor y el par de las ruedas.
- *Transmisión eléctrica*: un motor diésel acoplado a un alternador que genera electricidad para alimentar a un motor eléctrico que genera el movimiento del vehículo.



Figura 2.3. Locomotora diésel de transmisión hidráulica "Renfe 354"

c) Tracción eléctrica

Los vehículos de tracción eléctrica se pueden clasificar como se indica en la figura 2.4.



Figura 2.4. Clasificación vehículos de tracción eléctrica [4]

Como se puede observar, en la figura 2.4, se pueden encontrar vehículos con tracción eléctrica con motores de corriente continua o corriente alterna. Un ejemplo de locomotora de tracción eléctrica se puede observar en la figura 2.5.



Figura 2.5. Locomotora de tracción eléctrica "Renfe 269"

2.1.2. Material automotor

Material provisto de motor y destinado al transporte, sobre el mismo, de carga útil y dispuesto, eventualmente, para remolcar otros vehículos ferroviarios. Suelen estar compuestos de uno o más vehículos que forman una unidad. Existen automotores de tracción eléctrica y de tracción diésel-eléctrica.

Actualmente, el vehículo automotor más utilizado en trayectos cortos (cercanías) son las series 446 y 447 de Renfe (figura 2.6). Estos modelos surgieron en la década de los 80 ante el crecimiento de los trayectos cortos entre las grandes y medias ciudades españolas. Cuentan con una configuración (M-R-M) con dos coches motores y un coche remolcado.

Hoy en día, se están empezando a sustituir estas series por las series 463, 464 y 465 o también conocidos como “Civia” de Renfe que son vehículos automotores comercializados desde 2004 y tienen la gran ventaja respecto a las series anteriores que son trenes de piso bajo y son ideales para personas con movilidad reducida.



Figura 2.6. Serie 464 “Civia” y serie 447 de Renfe

2.1.3. Material auxiliar

Material rodante motorizado destinado a prestar servicio a los dos tipos de material motor descritos con anterioridad.

2.2. Material remolcado

Material rodante que necesita ser enganchado a material motor para conseguir movimiento, es decir no va motorizado. Se clasifican según el tipo de carga que lleven [4].

2.2.1. Coche

Vehículo destinado al transporte de personas. Las cajas de los coches metropolitanos se fabrican de acero al carbono o aluminio.

2.2.2. Furgón

Vehículo destinado al transporte de equipajes.

2.2.3. Vagón

Destinado al transporte de animales o cosas. Entre ellos se pueden distinguir:

- *Vagón jaula*: para el transporte de ganado.
- *Vagón porta-contenedores*: son vagones de plataforma que tienen sujeciones para los contenedores.
- *Vagón tolva*: para el transporte de gránulos sólidos como áridos, carbón, minerales, etc. En la figura 2.7, se puede observar un vagón tolva.



Figura 2.7. Vagón tolva

- *Vagón cisterna*: Para el transporte de líquidos y mercancías peligrosas.

2.3. Elementos del vehículo ferroviario

Dado que el presente Trabajo trata de un vehículo ferroviario, a continuación se exponen los elementos más característicos que lo componen [2].

2.3.1. Caja

En su interior se sitúan los viajeros, la mercancía, los motores, etc., según el tipo de vehículo (coche, vagón o locomotora).

2.3.2. Bastidor

Estructura en forma de “H”, que se observa en la figura 2.8, posee forma cerrada y está constituido por la unión de dos largueros y traviesas para formar un conjunto rígido. Su finalidad es constituir la estructura básica del bogie y servir de base sobre la que se montan el resto de componentes.

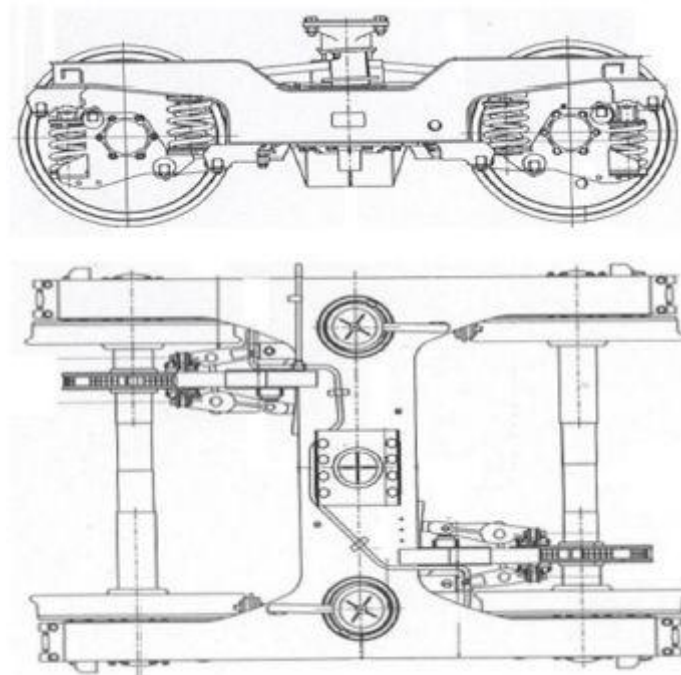


Figura 2.8. Bastidor de un vehículo ferroviario [2]

2.3.3. Larguero

Elemento longitudinal que forma parte de la estructura del bastidor de un vehículo.

2.3.4. Traviesas extremas o cabeceros

Elemento estructural situado en el extremo del bastidor de un vehículo que une los largueros de forma perpendicular a éstos y, que soporta normalmente los aparatos de choque y tracción. Al conjunto de elementos que configuran la caja del vehículo sobre la traviesa extrema se le denomina “testero”.

2.3.5. Reductores

Sistemas de engranajes que permiten variar el par motor. Incorporan distintas etapas de desmultiplicación que van montados en el bogie del vehículo. La figura 2.9 muestra los reductores de velocidad de un vehículo ferroviario.

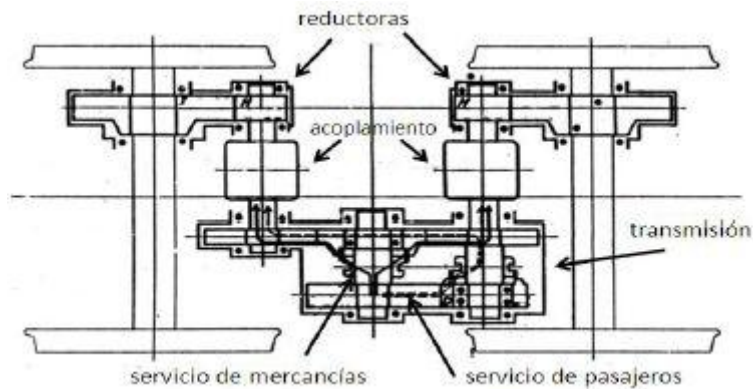


Figura 2.9. Reductores de velocidad de un vehículo ferroviario

2.3.6. Peso suspendido y no suspendido

El peso suspendido de un vehículo ferroviario es aquel que pasa por la suspensión para llegar al carril, es decir, está amortiguado. El peso no suspendido (ejes, cajas de grasa y todo o parte del peso de los motores y/o de la transmisión) está sin amortiguar. Cuanto mayor sea el peso no suspendido de un vehículo, más agresivo será este con la vía, ya que las cargas dinámicas incidirán sobre ella bruscamente.

2.3.7. Aparatos de tracción y choque

Los aparatos de tracción transmiten la fuerza de tracción a lo largo de todo el tren. Pueden ser enganches automáticos, cadenas, ganchos, barras, etc. Los elementos de choques están formados por dos topes situados en el testero del vehículo, tienen la misión de amortiguar las fuerzas longitudinales de compresión que se producen durante la marcha, tanto en las frenadas como en las paradas o los impactos que reciben los vagones en diferentes situaciones, protegiendo así la estructura de los vehículos y las mercancías que transportan.

2.3.8. Canalizaciones

Discurren a lo largo de toda la composición. Las principales son la conducción de aire para el frenado del tren (que acciona las zapatas o los discos de freno de los coches y vagones) y las líneas eléctricas para tracción, gobierno y servicios auxiliares de la composición, tales como por ejemplo climatización o luminaria en los coches de pasajeros.

2.4. Elementos de rodadura

Los elementos de rodadura permiten que el vehículo se mueva sobre la vía. Un vehículo ferroviario puede estar formado por ejes independientes o bogies. Para el desplazamiento de los vehículos son necesarios los órganos de rodadura que se presentan a continuación [2] [4].

2.4.1. Eje

Pieza cilíndrica de acero en la que se montan las ruedas. En el eje de un vehículo se distinguen tres partes esencialmente, como se observa en la figura 2.10.

- **Fuste** o cuerpo del eje comprendido entre ambas ruedas.
- **Secciones de calaje** sobre las que se calan o calzan las ruedas.
- **Manguetas**, sobre las que reposan los cojinetes de las cajas de grasa, que a su vez soportan el peso suspendido del vehículo.

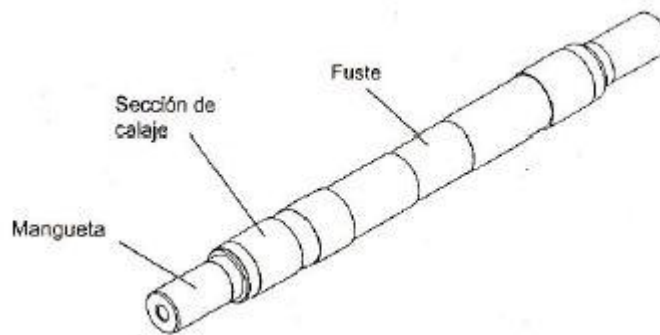


Figura 2.10. Eje de un vehículo ferroviario [2]

Para aligerar la masa no suspendida, a veces, se utiliza un mecanismo consistente en un taladro a lo largo de todo el eje.

Por otro lado, se denomina **eje montado** al conjunto de un eje y sus dos ruedas, caladas con arreglo a las especificaciones en vigor para cada ferrocarril.

Además del perfecto equilibrado de cada rueda, el centro de gravedad del eje montado ha de coincidir con el teórico, ya que en otro caso, y sobre todo si el eje fuera motor, la resultante del esfuerzo de tracción daría lugar a un par que alabearía el eje, forzando las pestañas contra el carril.

2.4.2. Bogie

Un bogie, es el conjunto de elementos constituidos por el bastidor con elementos de suspensión, rodadura y freno. Sus funciones principales son la de soportar la carrocería del vehículo ferroviario, proporcionar estabilidad en circulación, garantizar el confort de marcha mediante la absorción de las vibraciones. Minimizar las fuerzas centrífugas cuando el tren circula por curvas

a alta velocidad, minimizar la generación de irregularidades en la vía ferroviaria y la abrasión de la misma. Por lo general, se colocan dos bogies en cada coche, vagón o locomotora, uno en cada extremo.

Los bogies se pueden clasificar en dos tipos:

- Bogie motor.
- Bogie remolcado: no portan ni el motor ni la reductora, por lo que su diseño es significativamente más simple que el de los bogies motores.

Los esfuerzos de tracción y de frenado se transmiten desde el bastidor del bogie a la caja de la locomotora a través de barras de tracción. Cada una de ellas, como se puede observar en la figura 2.11, se compone de dos barras articuladas entre sí: una horizontal (2) articulada al punto más bajo del bastidor del bogie y otra inclinada con respecto al carril (3).

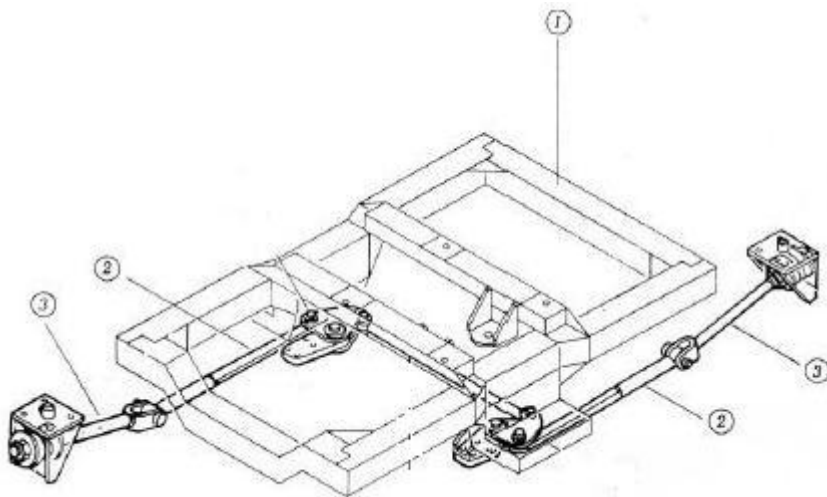


Figura 2.11. Barras de tracción de un bogie [2]

2.4.3. Rodamientos

Permiten el giro de la mangueta con el mínimo rozamiento posible y están lubricados habitualmente con grasa consistente.

2.4.4. Caja de grasa

Son los elementos que contienen los rodamientos; en la figura 2.12 se puede ver que están situadas en torno a la mangueta del eje y, sobre ellas, descansa el peso del vehículo a través de la suspensión. Permite el enlace entre el eje y la suspensión del vehículo ferroviario, transmitiendo todos los esfuerzos y permitiendo el giro del propio eje.

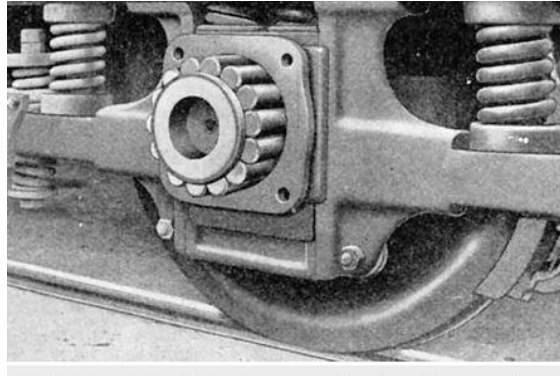


Figura 2.12. Caja de grasa

2.4.5. Ruedas

Son los elementos de forma circular que giran con su eje, teniendo su superficie de contacto con forma troncocónica. Las ruedas permiten el movimiento y guiado del vehículo. Actualmente, las ruedas son de tipo monoblock, como se puede observar en la figura 2.13, es decir, que están fabricadas de una sola pieza. La rueda tiene tres zonas diferenciadas.

- La **llanta**, es la superficie de rodadura, que presenta una forma concreta llamada perfil, que es ligeramente cónico y tiene la función de realizar el guiado, existiendo distintos tipos de perfiles dependiendo de la velocidad, el diámetro, la masa, la solución de amortiguación, etc.
- La parte central de la ruedas se llama **cubo**. Esta es la parte que se cala en la mangueta del eje.
- El **velo** es la zona de la rueda que une la llanta con el cubo, puede ser plano o presentar un prominencia, que disminuye la masa no suspendida, manteniendo o aumentado su resistencia lateral.



Figura 2.13. Rueda ferroviaria

Las ruedas ferroviarias montadas en ejes suelen tener diámetros comprendidos entre los 600 mm y 900 mm según el servicio que vayan a prestar; con diámetros menores para el caso de servicios tranviarios y mayores para el caso de metros puros.

El ataque rueda-carril, además del lógico desgaste, implica en un gran número de problemas por el ruido generado, ruido muy difícil de minimizar por otra parte y que se sitúa en las frecuencias de 400 a 4000 Hz usualmente. En el mercado, hay diversas situaciones para reducir este efecto, mediante la incorporación de absorbedores atornillados al propio cuerpo de la rueda y distribuidos radialmente.

La superficie de rodadura, presenta, normalmente una cierta inclinación sobre la horizontal, llamada conicidad, siendo, generalmente, su inclinación de 1/20 en el centro de la llanta, y sobre una longitud de 55 a 65 mm, y de 1/10 en el extremo opuesto a la pestaña. Debido a esto, se introduce el concepto de conicidad efectiva.

Conicidad efectiva (γ): ángulo cónico de la rueda que se forma entre el eje horizontal del conjunto de ruedas y la proyección de la base de rueda. En la figura 2.14 se expone un esquema que explica la conicidad de las ruedas.

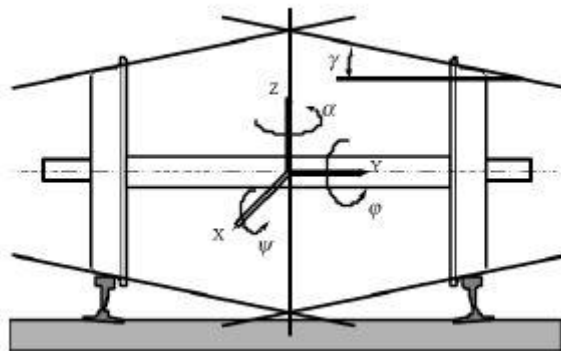


Figura 2.14. Conicidad de las ruedas de un vehículo ferroviario [2]

2.4.6. Placas de guarda

Piezas en forma de horquilla, como se observa en la figura 2.15, unidas a los largueros del bastidor y entre cuyos brazos o guías deslizan las cajas de grasa. Funcionan esencialmente como elemento de seguridad, cuyo objeto es mantener las cajas de grasa en su posición normal y sujetar el eje en caso de avería del muelle de suspensión.

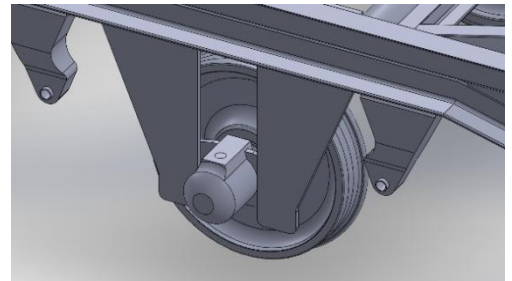


Figura 2.15. Placa de guarda

Es necesario que, en el sentido longitudinal del vehículo, se deje a la placa de guarda un juego suficiente en las guías, para facilitar el paso en las curvas y

para que no sea la placa de guarda, sino el resorte, es decir, un intermedio elástico, el que transmita al bastidor del vehículo los choques que reciben las cajas. Este juego longitudinal depende del radio de las curvas de la línea y de la máxima separación entre los ejes extremos del vehículo o base rígida de éste.

Sin embargo, precisa asegurarse que este juego no exceda, por desgaste de las guías, los límites admisibles para evitar la posible salida del eje y movimientos anormales de lazo en el vehículo. Por este motivo, el desgaste admitido en los ferrocarriles españoles no excede de 5 mm por cada lado de la caja de grasa.

2.5. Suspensión de un vehículo ferroviario

Se entiende por suspensión al conjunto de dispositivos elásticos destinados a proporcionar [2] [4]:

- La protección de los órganos del vehículo, cuales quiera que sea el estado de la vía y las condiciones de utilización.
- La estabilidad del vehículo, cuales quiera que sean los obstáculos, los desniveles de la ruta, el radio de viraje, la pendiente, etc.
- La comodidad de los pasajeros o la protección de las mercancías transportadas, reduciendo en cuanto sea posible los movimientos verticales, longitudinales, transversales y angulares de la parte suspendida.

A continuación, se realiza una breve explicación de los distintos tipos de suspensiones que se pueden montar en un vehículo ferroviario según los componentes que se utilicen, mostrados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Componentes de las suspensiones

ELEMENTOS ELÁSTICOS	ELEMENTOS AMORTIGUADORES
Garantizan la unión entre los órganos de rodadura y el vehículo, aportando una fuerza recuperadora cuando se produce la separación entre ellos.	Elementos disipadores de energía que hacen que decaiga el movimiento oscilatorio provocado por cualquier tipo de excitación que actúa sobre la suspensión.
<ul style="list-style-type: none"> • Ballestas • Muelles helicoidales • Barras de torsión • Muelles elastómeros • Muelles neumáticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Amortiguadores de fricción • Amortiguadores hidráulicos

La suspensión ferroviaria es doble: **primaria y secundaria**.

- *La suspensión primaria* tiene como misión absorber las irregularidades del carril y deformaciones geométricas de la vía, está situada entre las cajas de grasas y el bastidor del bogie, como se observa en la figura 2.16, o en el caso de los vagones de 2 ejes, entre la caja de grasa y el bastidor del vehículo. Asegura un reparto homogéneo de cargas sobre las ruedas, fundamental de cara a las prestaciones de freno y tracción y, sobre todo, de cara a evitar el riesgo de descarrilamiento, el cual está muy relacionado con la descarga de ruedas.
- *La suspensión secundaria* es la encargada de absorber los movimientos verticales y laterales del bogie con respecto al bastidor del vehículo; además, sirve de apoyo de éste con el bastidor del bogie. Presentan una elevada flexibilidad en ambas direcciones, vertical y lateral para el filtrado de las vibraciones.

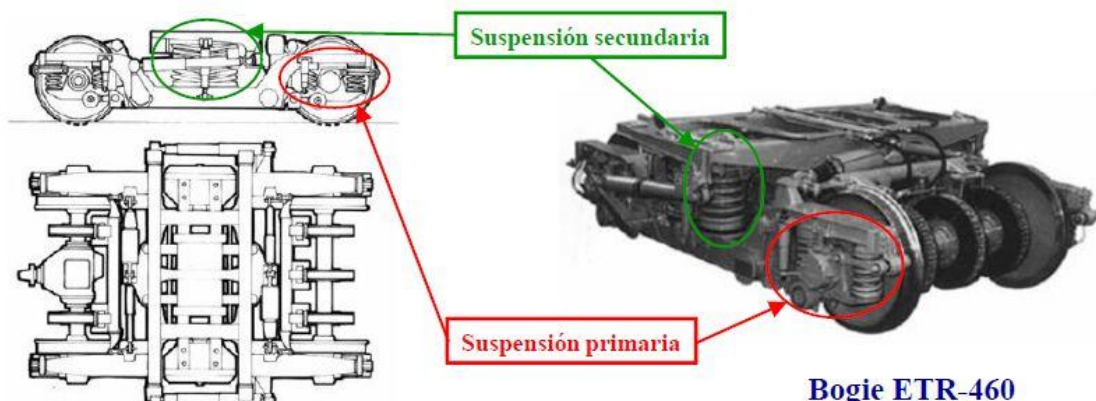


Figura 2.16. Localización de suspensión primaria y secundaria [2]

2.5.1. Elementos elásticos

- Ballestas: formadas por diferentes hojas de acero superpuestas de sección tanto constante como variable (perfil parabólico o trapezoidal). En la figura 2.17 se observa la forma de una ballesta y sus partes. Son uno de los componentes de suspensión más antiguos y todavía perduran debido a las ventajas que presentan:

- Economía.
- Amortiguamiento propio.
- Realización de funciones de guiado lateral y longitudinal.

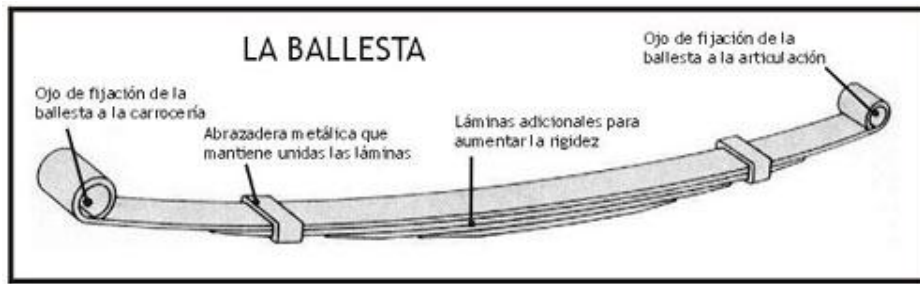


Figura 2.17. Partes de una ballesta

- Resortes helicoidales: son de acero de alta resistencia formando una hélice, de diámetro y paso, tanto constante como variable, que trabaja a flexión, aunque no presentan ningún tipo de amortiguamiento importante y por eso van siempre asociados a algún disipador externo. En la figura 2.18, se observan los muelles helicoidales de un vehículo ferroviario. Ventajas que presentan:

- Más compactos.
- Regulación más precisa.

En algunos vehículos, es habitual utilizar resortes montados concéntricamente uno dentro de otro (este montaje es equivalente a dos resortes en paralelo).

En ocasiones, estos resortes se montan con altura libre diferentes, de forma que uno de ellos comienza a deformarse, una vez que el otro ha alcanzado ya una cierta deformación.



Figura 2.18. Suspensión con muelles helicoidales

- Muelles de elastómeros: están fabricados de caucho o de materiales compuestos, presentan una histéresis natural importante y, por tanto, una adecuación para la supresión de vibraciones de alta frecuencia. El comportamiento de estos materiales puede variar considerablemente en función de la composición y de su forma.

Ventajas que presentan:

- Evita el desgaste entre las superficies con deslizamiento.
- Reduce los ruidos provenientes de la alta frecuencia (uso extendido en ferrocarriles subterráneos).

Inconvenientes:

- Tendencia natural de estos elementos a fluir o hacerse inestables.
- Presentan también una memoria de carga, debido a un cambio de propiedades permanente o semipermanente como resultado de cargas continuas u ondulatorias.
- La temperatura, por su parte, produce un cambio en la altura del muelle, conocido como "efecto Joule", que aunque resulta completamente reversible, puede llegar a modificaciones de un 12% de cambio de la altura inicial frente a cambios climáticos de 30°C.

- Suspensión neumática: se implanta en vehículos destinados al transporte de pasajeros donde la carga puede suponer el doble de la tara, presentando ventajas frente a otros sistemas por la dificultad de variación del comportamiento con las condiciones de funcionamiento, y la necesidad en lo referente al mantenimiento de la altura del suelo en variadas necesidades de utilización. Esta suspensión tiene la forma de la figura 2.19.



Figura 2.19. Suspensión neumática

Ventajas:

- La suspensión neumática, mantiene la altura de suspensión constante, mediante la inyección y extracción de aire de los resortes neumáticos.
- También permite trabajar a los amortiguadores alrededor de una posición predeterminada.
- Otra ventaja que tienen es que reducen la amplitud de cabeceo y de balanceo, al aceptar una ligera corrección dinámica.
- Atenúan los ruidos de las ruedas y los frenos, al no existir ninguna ligazón mecánica directa entre las ruedas y la parte suspendida.

Inconvenientes:

- Más cara de instalar.
- Un deterioro de los resortes o una deficiencia de la fuente de energía deja sin efecto la suspensión, siendo esta la razón de que ciertos constructores combinen la suspensión neumática con una suspensión metálica.
- La suspensión neumática, al carecer de estabilidad longitudinal y transversal obliga a la utilización de órganos de empuje y de reacción, lo cual minimiza la reducción de peso que tiene como ventaja.

2.5.2. Elementos amortiguadores

El amortiguador tiene como misión devolver en el mínimo de tiempo el resorte a su posición de equilibrio, absorbiendo desde el punto de vista del confort, la energía cinética transmitida a la masa suspendida y reduciendo, desde el punto de vista de la estabilidad en ruta, el tiempo durante el cual varía la adherencia de las ruedas.

- Amortiguadores de fricción: se utilizan en suspensiones de vagones de mercancías de vehículos ferroviarios. Constan de elementos de fricción a los cuales se deriva o hace pasar parte de la carga vertical que los pre-comprimen.

Los amortiguadores de fricción presentan varias desventajas entre las que cabe destacar:

- Mientras que no se supera la fuerza de fricción, la suspensión permanece bloqueada, y el vehículo queda sin suspensión.
- Una vez superada la fuerza de fricción, la fuerza amortiguadora disminuye en vez de aumentar con la velocidad como sería deseable.
- Su comportamiento se altera con el desgaste.
- Es necesario reponer las piezas desgastadas periódicamente.

- Amortiguadores hidráulicos: La principal ventaja que tienen respecto con los amortiguadores de fricción es que la fuerza amortiguadora crece con la velocidad, por este motivo son mucho más usados para todo tipo de vehículos. Básicamente, los amortiguadores hidráulicos constan de un pistón que trabaja dentro de un cilindro en el que existe aceite a ambos lados del pistón (de doble efecto). Como se observa en la figura 2.20, existen dos tipos de amortiguadores: bitubo y monotubo. A su vez los amortiguadores bitubo se dividen en presurizados y no presurizados. A continuación se describen los tres tipos de amortiguadores hidráulicos.

- **Amortiguadores bitubo no presurizados:** disponen de un doble tubo con el fin de absorber el aceite desplazado en la cámara principal por el vástago que mueve el pistón, ya que cuando el amortiguador se comprime el vástago se va introduciendo en la cámara ocupando un volumen que antes ocupaba el aceite.

Inconvenientes:

- La columna de aceite de la cámara principal cae por gravedad cuando el vehículo permanece parado durante mucho tiempo.
- El aceite se contrae como consecuencia de su enfriamiento al final de un viaje y se succiona aire hacia la cámara principal.

- **Amortiguadores bitubo presurizados:** constan de una cámara de gas de baja presión (4 bares). La función principal de la carga de gas es minimizar la aireación del fluido hidráulico. La presión del gas nitrógeno comprime las burbujas de aire en el fluido hidráulico. Esto evita que el aceite y el aire se mezclen y formen espuma.

Ventajas respecto a los amortiguadores bitubo no presurizados:

- Mejor confort de marcha.
- Mejores propiedades de amortiguación en condiciones extremas.
- Reducción de ruido de origen hidráulico producido por el amortiguador.

- **Amortiguadores monotubo presurizados:** utilizan una cámara de gas (nitrógeno a alta presión) para absorber por compresión de la misma el exceso de aceite que se produce cuando se introduce el pistón. Un pistón flotante separa este gas del aceite impidiendo que se mezclen. Cuando el aceite, al desplazarse el vástago, comprime el gas, éste sufre una variación de volumen que permite dar una respuesta instantánea y un funcionamiento silencioso. Los amortiguadores a gas además de amortiguar también hacen en cierto modo de resorte elástico, es por ello que este tipo de amortiguadores vuelven a su posición cuando se deja de actuar sobre ellos.

Ventajas:

- Buena refrigeración debido a que la cámara está en contacto directo con el aire.
- Mayor diámetro de pistón para el mismo diámetro exterior, lo que permite reducir las presiones de operación.
- El nivel de aceite no baja al quedar el vehículo estacionado, lo que evita funcionamientos deficientes al volver a arrancar.

Desventajas:

- Mayores costos derivados de mayores requerimientos de precisión de fabricación y de estanqueidad del gas.

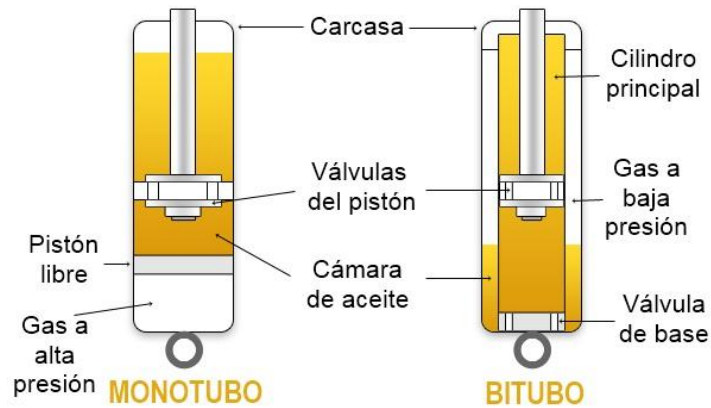


Figura 2.20. Comparación amortiguador monotubo y bitubo

Para concluir con este capítulo, se realiza una clasificación de los tipos de suspensión de acuerdo al **tipo de control que se ejerce en sus parámetros**. De esta forma, se encuentran tres tipos de suspensiones [5].

- **Suspensión pasiva:** los sistemas de suspensión pasivos se caracterizan por no recibir directamente aplicación alguna de energía externa. Almacenan energía mediante resortes y la disipan mediante amortiguadores. Los parámetros de una suspensión pasiva son fijos y corresponden a un compromiso entre las características del terreno, la carga soportada y el confort. En la figura 2.21 se ve su funcionamiento.

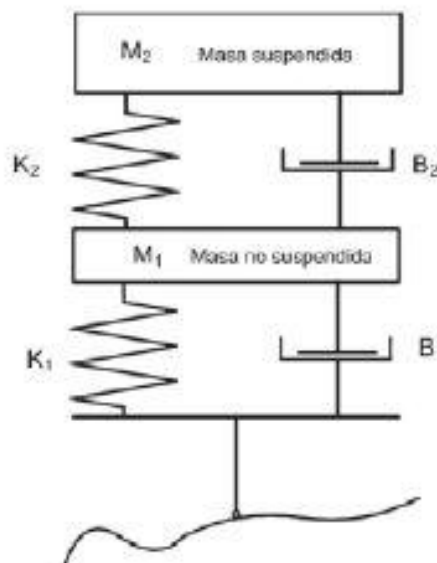


Figura 2.21. Suspensión pasiva [5]

- **Suspensión semi-activa:** la suspensión semi-activa se caracteriza por tener amortiguadores cuyo coeficiente de amortiguamiento es modificado por un control externo. Generalmente, estas suspensiones controlan las frecuencias bajas con elementos activos y las frecuencias altas con elementos pasivos. Diferentes tipos de amortiguadores semiactivos han sido investigados, siendo los más representativos los amortiguadores magnetorreológicos, cuya respuesta varía con el campo magnético aplicado. Su rendimiento en trenes es comparable al de una suspensión activa y permite controlar su movimiento lateral. En la figura 2.22 se observa su funcionamiento.

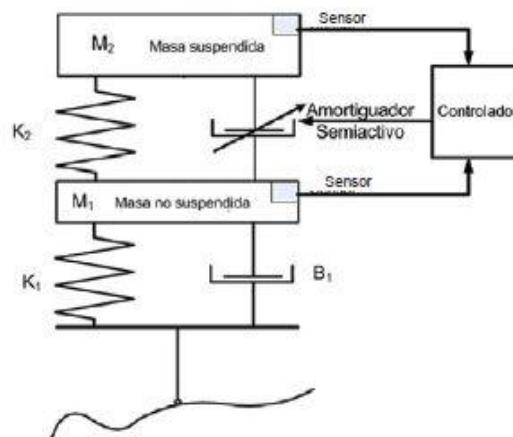


Figura 2.22 Suspensión semi-activa [5]

- **Suspensión activa:** una suspensión activa almacena, disipa e introduce energía al sistema por medio de actuadores, cuyo accionador es regulado a través de sensores y controladores. Para ejercer la fuerza de control se pueden utilizar diferentes clases de actuadores: electro-hidráulicos, neumáticos y electromagnéticos. Los sensores se emplean para registrar el comportamiento del vehículo ante las perturbaciones y así definir la respuesta de acuerdo al objetivo de control. En la figura 2.23, se observan las partes de la suspensión activa.

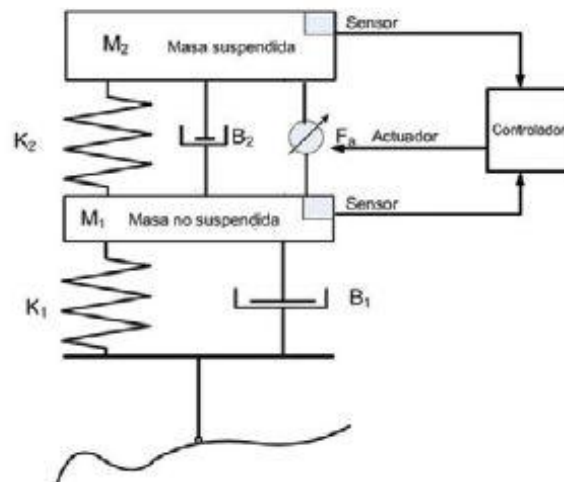


Figura 2.23. Suspensión activa [5]

CAPÍTULO 3. MODELADO DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO

Por medio del software SIMPACK, se ha construido un vehículo ferroviario que sirve para realizar simulaciones del modelo.

3.1. Software Simpack

SIMPACT es un software general de simulación multicuerpo que se utiliza para ayudar a los ingenieros en el análisis y diseño de sistemas mecánicos y mecatrónicos.

Desde diseños conceptuales iniciales, a través de la producción y rediseños, SIMPACK se utiliza para ayudar a los ingenieros plenamente a comprender y optimizar los sistemas. En esencia, SIMPACK permite a los fabricantes obtener una ventaja competitiva al ofrecer la capacidad de crear productos de alta calidad en un corto periodo de tiempo y de manera eficiente reduciendo así los costos generales en el diseño, producción y mantenimiento.

SIMPACK se utiliza, principalmente, en las industrias del ferrocarril, motor, turbinas de viento, transmisión de potencia automotriz y aeroespacial. Dentro de todas las industrias, SIMPACK se utiliza para el diseño de los componentes y análisis completo del sistema. Además de tener la dinámica y el control interno en cuenta, SIMPACK también puede considerar cualquier influencia externa en el sistema, por ejemplo, alteraciones del terreno o cargas aerodinámicas, entre otros.

Como resultado de las aplicaciones en la industria ferroviaria, el solver de SIMPACK es capaz de manejar sistemas dinámicos "rígidos" (es decir, el contacto entre rueda/carril) y está especializado para el choque (que se ejecuta a través de los interruptores de ferrocarril). Estos activos de SIMPACK permiten la investigación de fenómenos extremos dentro de todos los campos de aplicación, por ejemplo, el cambio de marchas, ruptura de emergencia, pérdida de contacto o el juego entre otros campos [6].

3.2. Construcción del modelo

La construcción del modelo, se ha realizado en diferentes pasos [7].

- *Creación de un juego de ruedas.*
- *Creación de un bogie.*
- *Creación del cabezal fijo.*
- *Creación de una suspensión primaria.*
- *Creación de una suspensión secundaria.*
- *Creación de un vehículo ferroviario.*

Antes de empezar con el modelado del vehículo, se crea un directorio específico donde se guarda el modelo.

En primer lugar, se crea la carpeta "modelo tren". Dentro de esta carpeta se crean dos subcarpetas: "database" y "modelo principal".

- En la carpeta "modelo principal" se guarda el vehículo ferroviario final.
- En la carpeta "database" se crean tres subcarpetas: "subestructuras", "funciones" y "variables" donde se guardan los archivos necesarios para el modelado del vehículo ferroviario.

Ahora ya se puede comenzar con la construcción del modelo.

3.2.1. Creación juego de ruedas

La realización del juego de ruedas se puede hacer de dos maneras:

1. Se pueden realizar a partir de un modelo general de SIMPACK siguiendo los pasos de la ayuda que proporciona el programa (Ayuda. Apartado F4.1. [6])
2. Crear un modelo del tipo “Rail_wheelset”, guardarlo como una subestructura y añadir a este modelo cuatro marcadores para conectar las ruedas construidas con la suspensión primaria del vehículo ferroviario en los puntos mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Marcadores para la colocación de la suspensión primaria

MARCADOR	PUNTO
PSR (Primary spring right)	(0,1,0)
PSL (Primary spring left)	(0,-1,0)
PDR (Primary damper right)	(0,1,0)
PDL(Primary damper left)	(0,-1,0)

En este caso, se ha realizado el juego de ruedas creando un modelo tipo “Rail_wheelset” y añadiéndole los marcadores anteriormente indicados para poder poner la suspensión del vehículo.

Con este método, los valores de masa y momentos de inercia del modelo se proporcionan automáticamente, aunque se pueden variar manualmente si se quiere realizar un vehículo acorde a unas características dadas. En este caso, esto no es necesario y se mantienen todos los valores que se dan por defecto.

El juego de ruedas se observa en la figura 3.1.

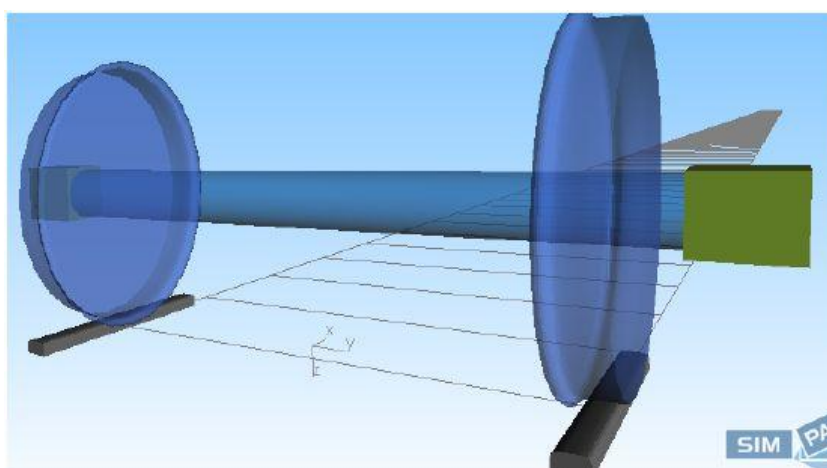


Figura 3.1. Juego de ruedas

3.2.2. Creación de bogie

Para la construcción del bogie del vehículo, se abre un nuevo modelo en SIMPACK, pero en este caso del tipo “Rail_Track”, en este tipo ya está introducido el sistema de referencia y el valor de la gravedad que se usan de acuerdo con los requerimientos ferroviarios.

Al ser también una parte del vehículo, el bogie se guarda en la carpeta subestructuras.

A continuación, se le añade el juego de ruedas creado anteriormente y se hace dos veces, uno para el juego de ruedas delantero (WSF) y otro para el trasero (WSR), variando la distancia longitudinal en ambos como se indica en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Posición de los juegos de ruedas

Subestructura	Distancia longitudinal
WSF	1.28 m
WSR	-1.28 m

El modelo tiene la forma mostrada en la figura 3.2.

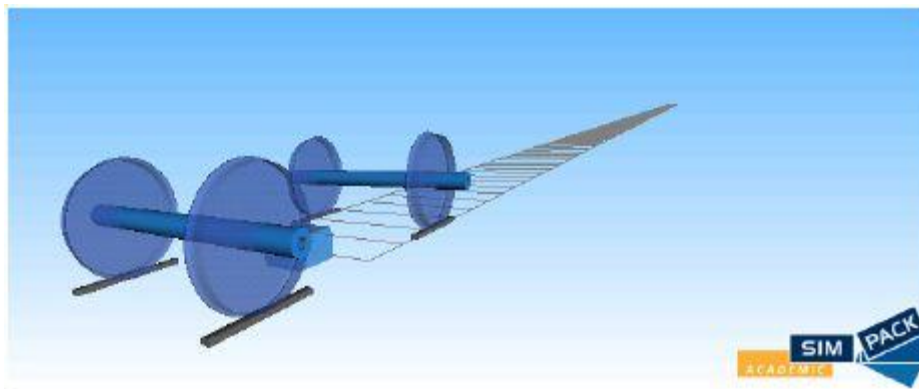


Figura 3.2. Juegos de ruedas colocados

Después de realizar los juegos de ruedas, se modeliza el cuerpo (“Body”) del bogie. En las propiedades del “Body” se introducen los valores de la masa, momentos de inercia y posición del centro de gravedad:

- Masa: 2615 kg.
- I_{xx} : 1722 kg·m².
- I_{yy} : 1476 kg·m².
- I_{zz} : 3076 kg·m².
- Posición del centro de gravedad: (0, 0, -0,6) [m].

Dentro de este “Body” se crean dos primitivas para dar la forma adecuada al bogie del vehículo. Las primitivas, en Simpack, son las geometrías que se usan para el modelado de un sistema. Las geometrías creadas son las siguientes:

- Primitiva 1: “\$P_bogie_frame”, se indica que sea del tipo “Wheel Rail Bogie” y se introducen los valores de longitud y altura para posicionar esta primitiva. Esta primitiva se realiza para hacer la estructura del bogie (ver figura 3.3.).
- Primitiva 2: “\$P_bogie_frame_cubo” esta primitiva es del tipo “Cuboid” al igual que la primitiva anterior se introducen los valores de longitud y altura del cubo y la posición en la que se coloca. Esta primitiva representa la parte central del bogie (ver figura 3.4.).

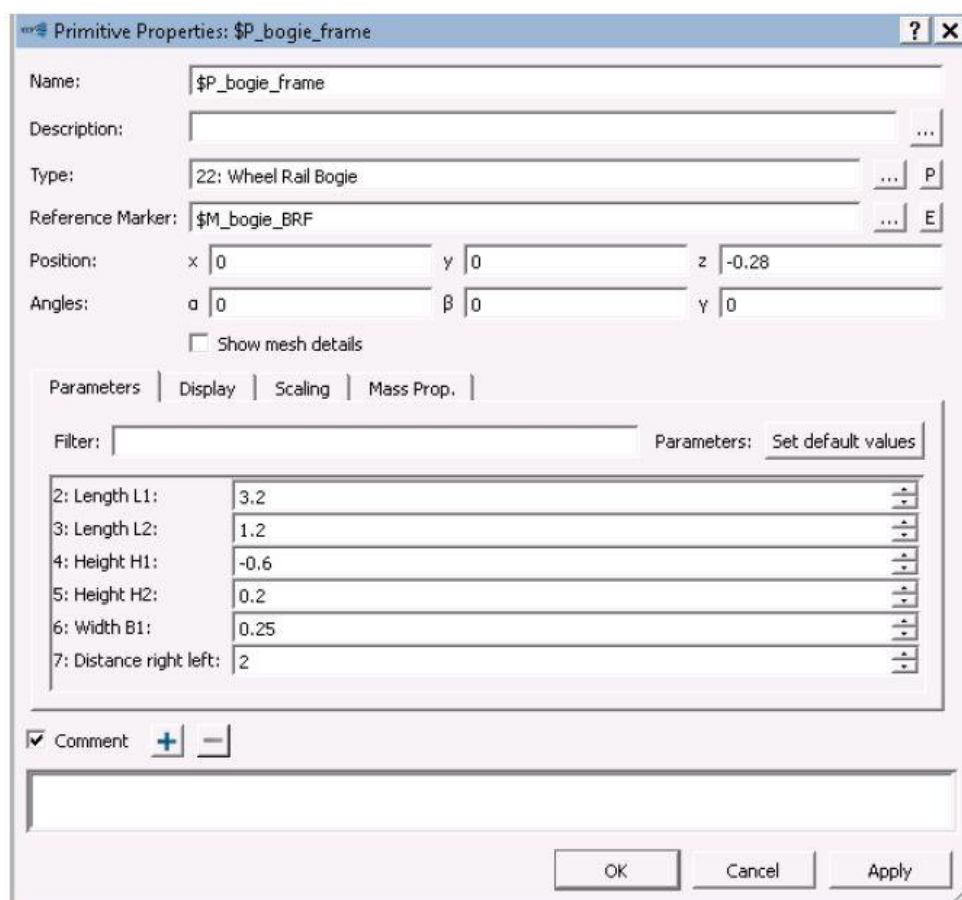


Figura 3.3. Primitiva "\$P_bogie_frame"

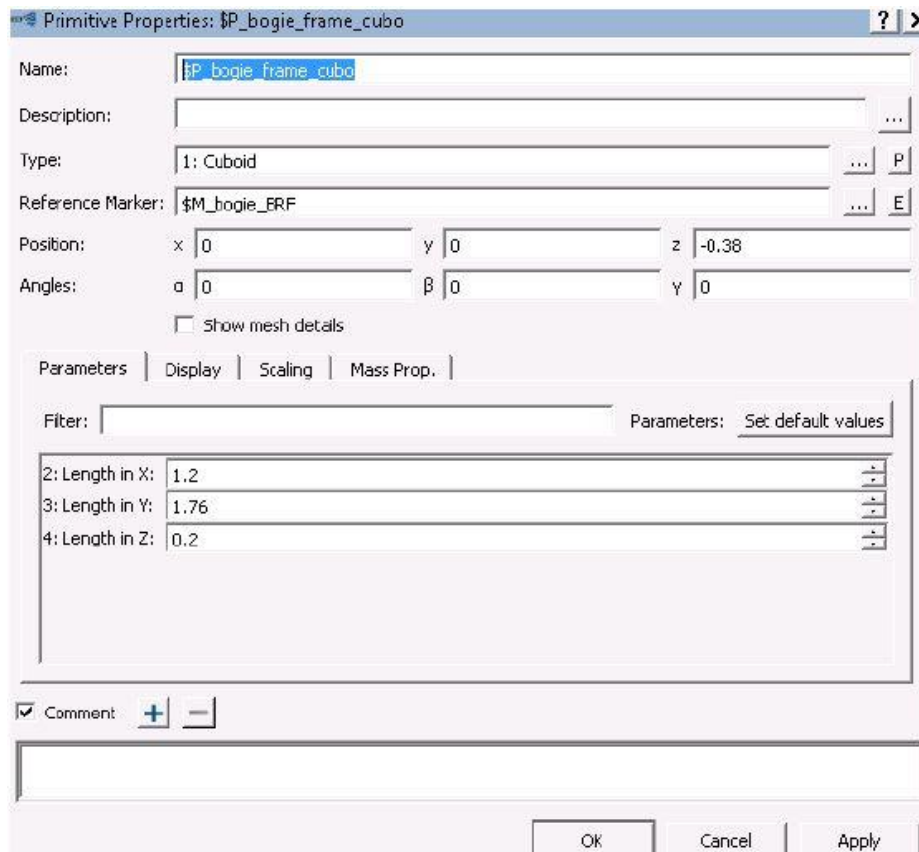


Figura 3.4. Primitiva "\$P_bogie_frame_cubo"

El bogie que se ha modelado se muestra en la figura3.5.

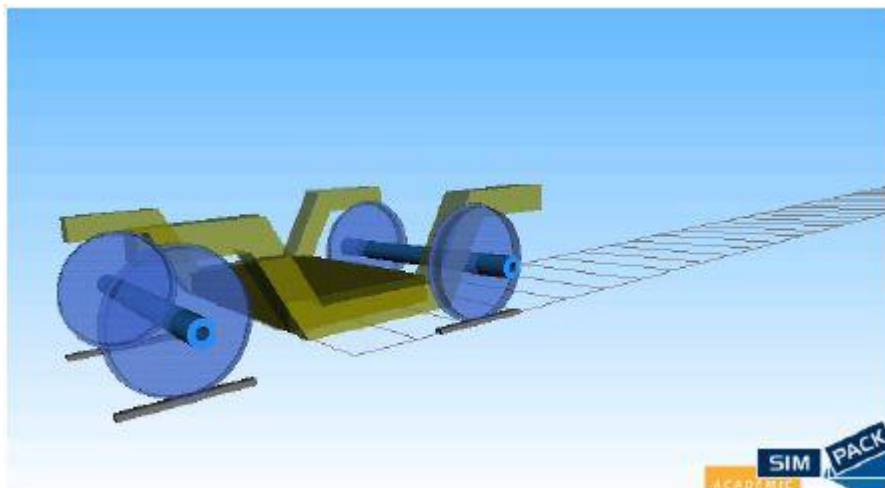


Figura 3.5. Bogie finalizado

Para finalizar el modelado del bogie, se crean nuevos marcadores para poder conectar el bogie a la suspensión primaria y a la suspensión secundaria (para muelles y para amortiguadores ambas). Estos marcadores son del tipo “Identity Matrix”. Los marcadores se colocan según los datos de la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Marcadores para conectar bogie con la suspensión del vehículo

Marcador	Posición (m)
PrimSpring_FR	(1.28, 1, -0.88)
PrimSpring_FL	(1.28, -1, -0.88)
PrimSpring_RR	(-1.28, 1, -0.88)
PrimSpring_RL	(-1.28, -1, -0.88)
PrimDamp_FR	(1.28, 1, -0.88)
PrimDamp_FL	(1.28, -1, -0.88)
PrimDamp_RR	(-1.28, 1, -0.88)
PrimDamp_RL	(-1.28, -1, -0.88)
SecSpringR	(0, 1, -0.525)
SecSpringL	(0, -1, -0.525)
SecDampLatR	(0, 0.23, -0.7)
SecDampLatL	(0, -0.23, -0.7)
SecDampVertR	(0, 1.3, -0.4)
SecDampVertL	(0, -1.3, -0.4)
SecRoll	(0, 0, -0.8725)
TractionRod	(0, 0, -0.6)
Bumpstop	(0, 0, -0.8725)

3.2.3. Creación del cabezal fijo

Dentro de la subestructura bogie se crea un nuevo cuerpo: “\$B_dummy”, este “Body” es un cuerpo virtual de masa y momentos de inercia infinitesimos ($1e-06\text{kg}$ y $1e-06\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ respectivamente) y sirve para unir el bogie con el vehículo ferroviario. Este cabezal, tiene cero grados de libertad (no gira, ni se desplaza) ya que está fijo al bogie.

Para que tenga cero grados de libertad se tiene que comprobar en el “Joint” del cuerpo que sea de tipo 0: “0 degrees of freedom”.

Este cabezal, necesita seis marcadores para conectarse a la suspensión secundaria (dos para conectarse a los muelles verticales y cuatro para conectarse con los amortiguadores verticales y laterales). Los marcadores se indican en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Marcadores para conectar el cabezal fijo a la suspensión

Marcador	Posición (m)
SecR	(0,1,-1.13)
SecL	(0,-1,-1.13)
DampRVert	(0,1.3,-0.925)
DampLVert	(0,-1.3,-0.925)
DampRLat	(0,0.665,-0.7)
DampLLat	(0,-0.665,-0.7)
SecRoll	(0,0,-0.8725)
Bumpstop	(0,0,-0.65)

3.2.4. Creación de la suspensión primaria

Las suspensiones de un vehículo ferroviario, tanto primaria como secundaria, se componen de dos componentes generales: un muelle y un amortiguador.

Para el modelado del muelle de la suspensión primaria, se debe crear un elemento tipo “Force element” y se introducen los valores de la figura 3.6.

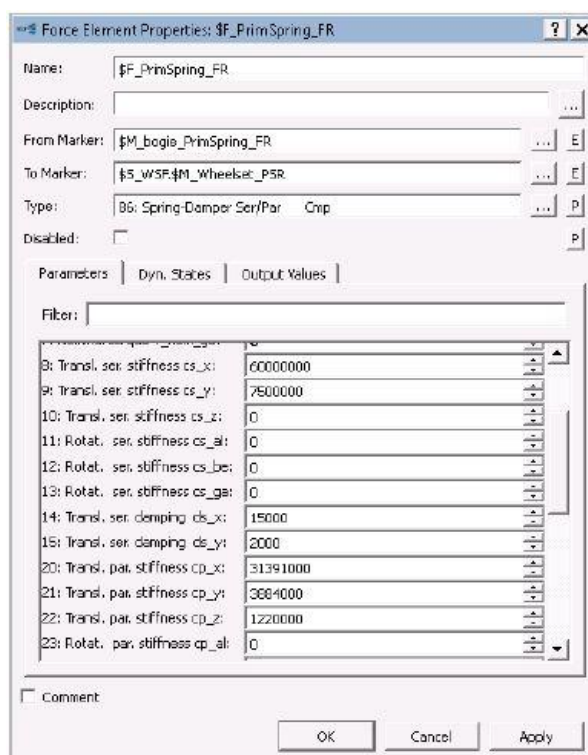


Figura 3.6. Modelado del muelle de la suspensión

Para el amortiguador de la suspensión primaria, se debe crear un elemento del tipo “Force element” y se introducen los datos de la figura 3.7.

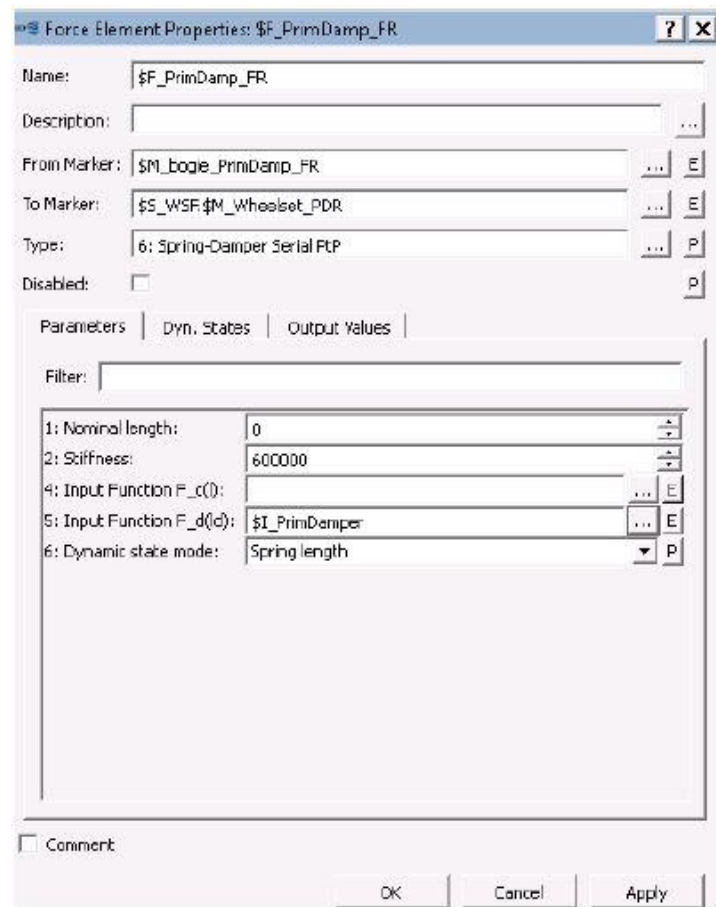


Figura 3.7. Modelado del amortiguador de la suspensión

Además de esto, se carga la función que describe el funcionamiento del amortiguador vertical (“PrimDamp_Vert_d.if2”) que se encuentra en la carpeta “funciones” como se muestra en la figura 3.8.

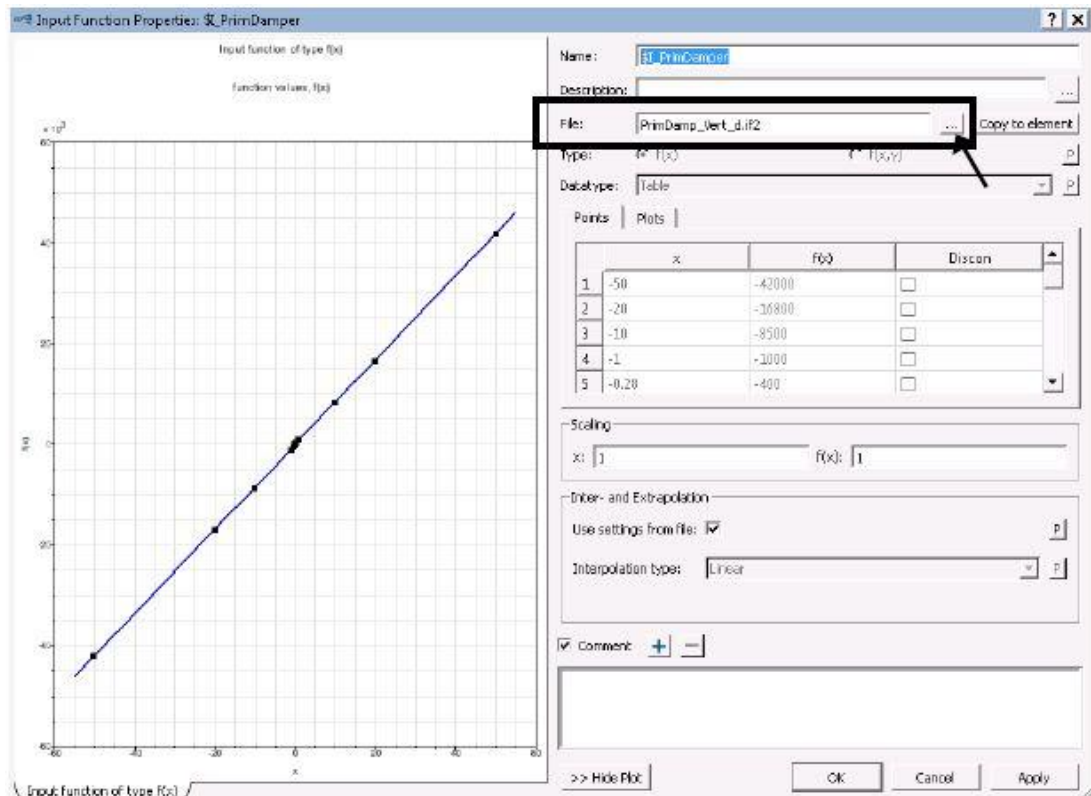


Figura 3.8. Introducción de la función para el comportamiento de la suspensión vertical

Los pasos que se explican anteriormente, hay que realizarlos para las cuatro ruedas del bogie. Por tanto, existen cuatro elementos tipo “Force element” para los muelles y cuatro elementos tipo “Force element” para los amortiguadores de la suspensión primaria del vehículo.

3.2.5. Creación de la suspensión secundaria

Para el modelado de la suspensión secundaria, se siguen los mismos pasos que se han seguido para la suspensión primaria y además se añade el modelado de los amortiguadores laterales, la barra antitorsión y el “bumpstop”.

Para el muelle de la suspensión secundaria, se crea un elemento tipo “Force element” y se introducen los valores de la figura 3.9.

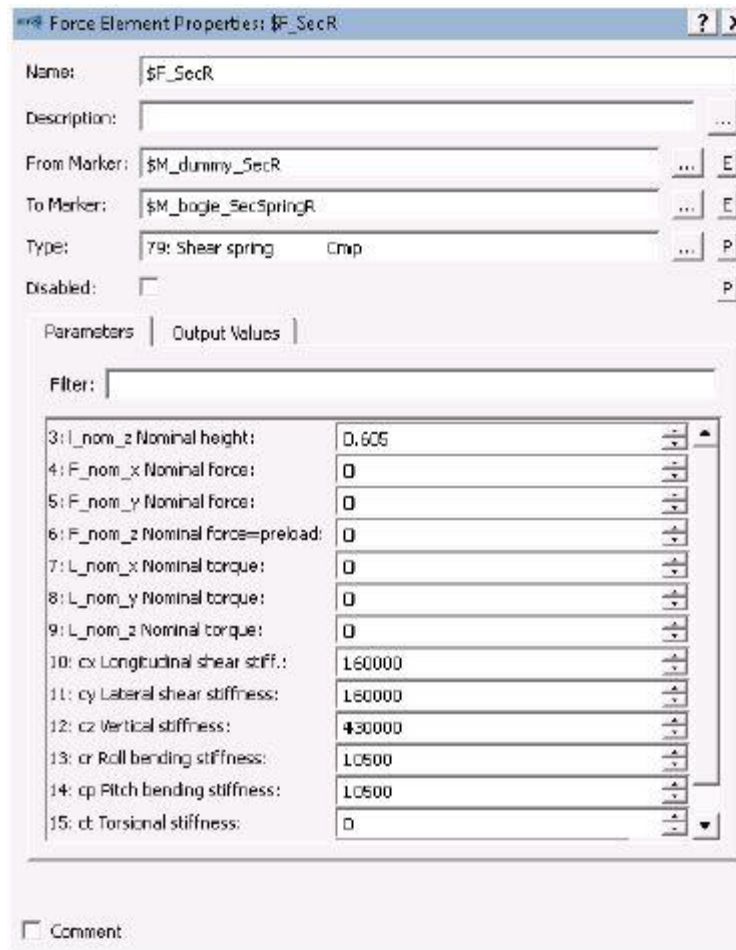


Figura 3.9. Modelado del muelle de la suspensión secundaria

Para el amortiguador vertical de la suspensión secundaria se crea un elemento del tipo “Force element”, se introducen los valores que lo caracterizan y la función que describe el comportamiento del amortiguador (“PrimDamp_Vert_d.if2”) como se puede observar en las figuras 3.10 y 3.11.

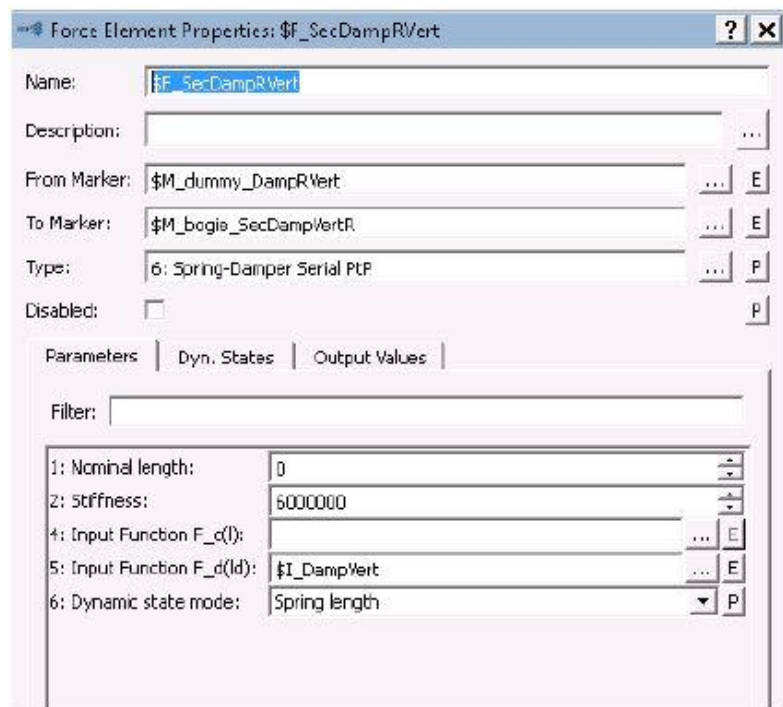


Figura 3.10. Modelado del amortiguador de la suspensión secundaria

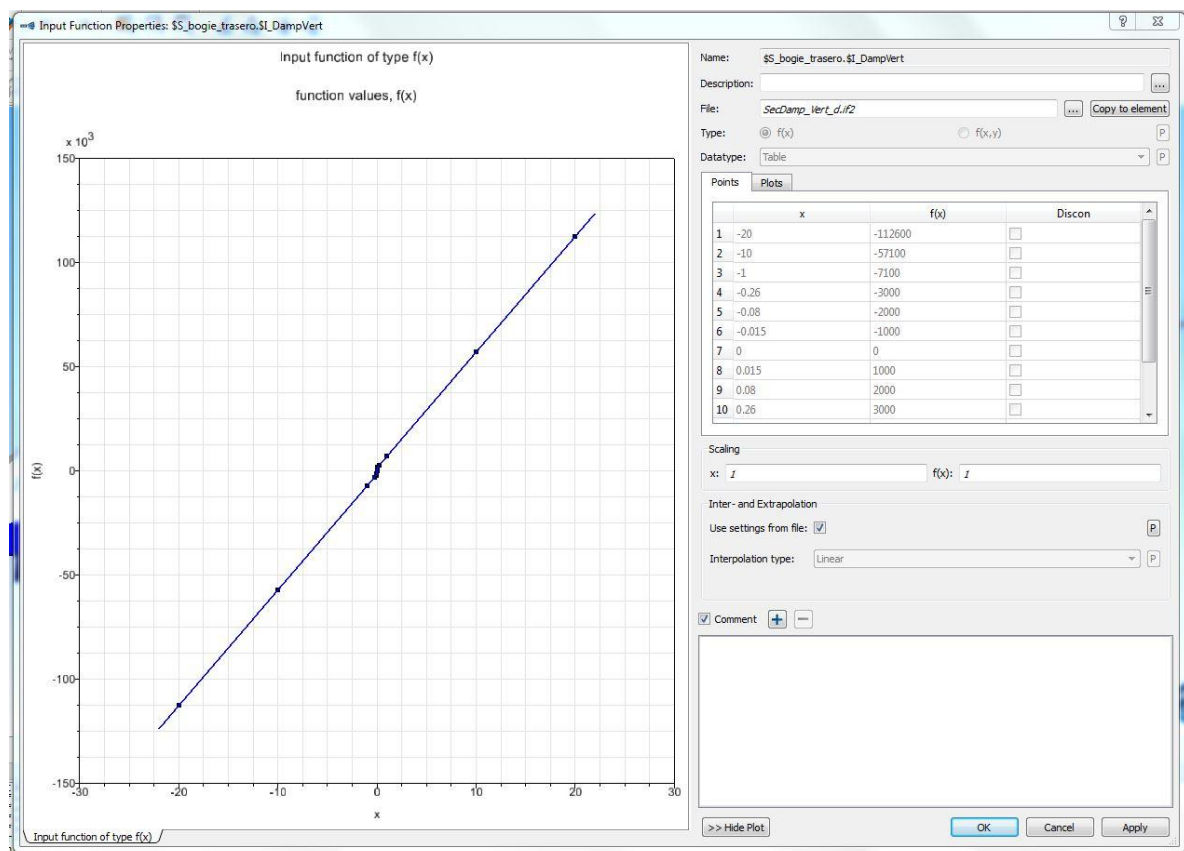


Figura 3.11. Introducción de la función que determina el comportamiento del amortiguador

Los pasos que se describen anteriormente hay que repetirlos para las cuatro ruedas del bogie.

Para los amortiguadores laterales que forman parte de la suspensión secundaria, se siguen los mismos pasos que para los amortiguadores verticales. Lo único que cambia es que, en este caso, la función que describe su funcionamiento es otra, (“SecDamp_Lat_d.if2”) que se encuentra en la carpeta “funciones”.

Para modelar la barra antitorción se crea un elemento tipo “Force element” y se introducen los valores de la figura 3.12.

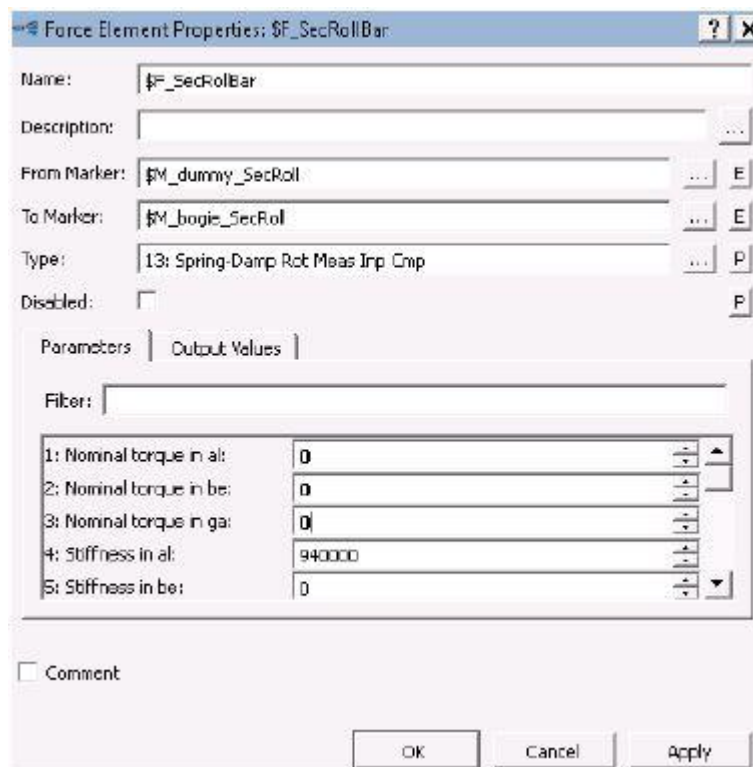
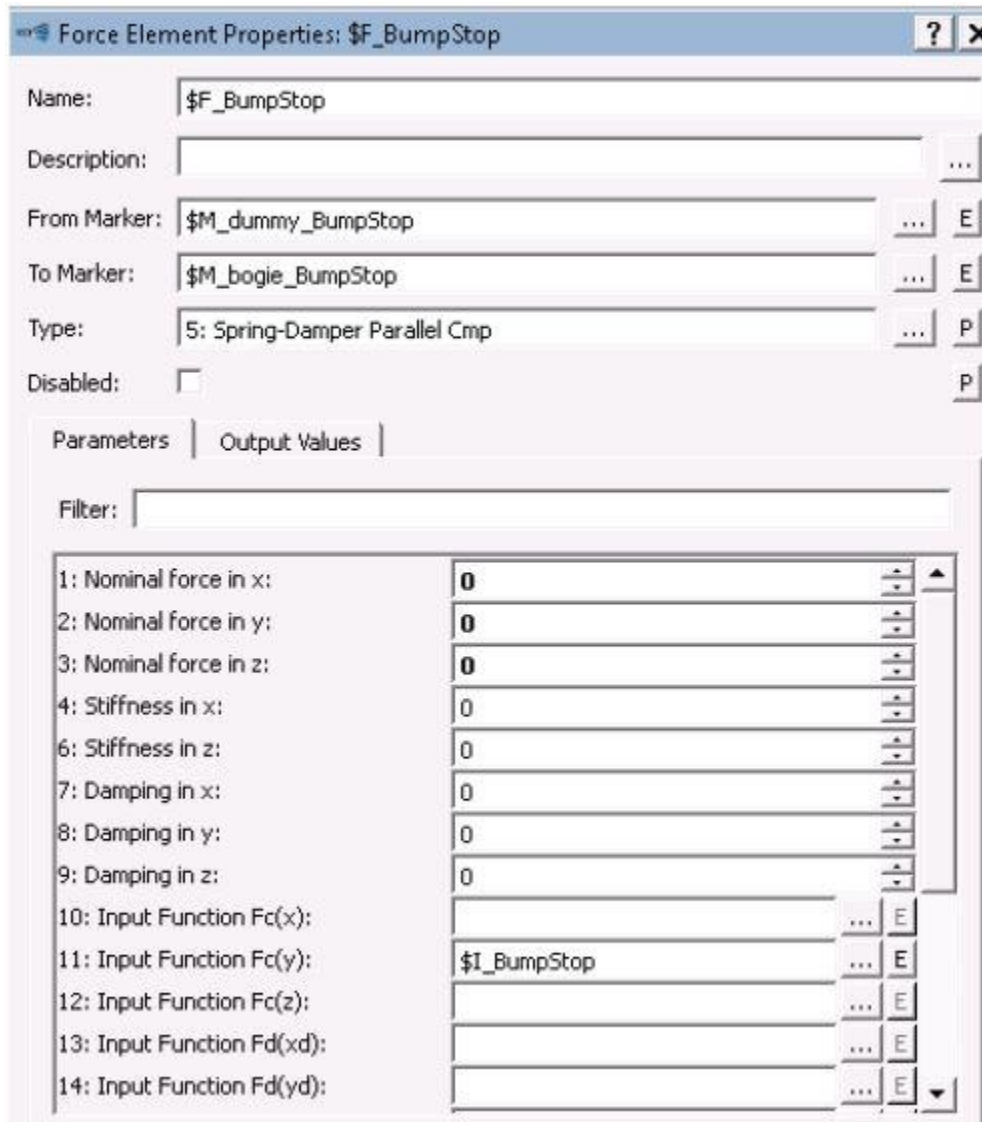


Figura 3.12. Modelado de la barra antitorción

Por último se modela el “bumpstop” (amortiguador usado para evitar choques longitudinales). Primero se debe crear la función “\$I_bumpstop” e importar los datos del fichero “Bumpstop.if2” que se encuentra en la carpeta “funciones” (figura 3.13).



Force Element Properties: \$F_BumpStop

Name: \$F_BumpStop

Description:

From Marker: \$M_dummy_BumpStop

To Marker: \$M_bogie_BumpStop

Type: 5: Spring-Damper Parallel Cmp

Disabled: ☐

Parameters | Output Values

Filter:

1: Nominal force in x:	0	
2: Nominal force in y:	0	
3: Nominal force in z:	0	
4: Stiffness in x:	0	
6: Stiffness in z:	0	
7: Damping in x:	0	
8: Damping in y:	0	
9: Damping in z:	0	
10: Input Function Fc(x):		...
11: Input Function Fc(y):	\$I_BumpStop	...
12: Input Function Fc(z):		...
13: Input Function Fd(xd):		...
14: Input Function Fd(yd):		...

Figura 3.13. Modelado del BumpStop

3.2.6. Creación vehículo ferroviario

Los pasos para crear el vehículo ferroviario son los siguientes.

Crear un nuevo modelo tipo “Rail_track” y guardar el modelo con el nombre “wagon” en la carpeta “modelo principal”.

Añadir al programa todas las carpetas que se van a utilizar para la modelización del vehículo ferroviario (subestructuras, funciones, variables) en “Globals”→ Search Path.

Importar los bogies (delantero y trasero) con el comando “Create substructure”.

A continuación, se modifican las posiciones de las ruedas de los bogies tanto delantero como trasero para colocarlos en el raíl con la separación correcta (figuras 3.14 a y 3.14 b).

Las posiciones de las ruedas son las siguientes:

- Posición longitudinal del bogie trasero: 1.28m.
- Posición longitudinal del juego de ruedas delantero del bogie trasero: 2.56m.
- Posición longitudinal del juego de ruedas trasero del bogie trasero: 0m.
- Posición longitudinal del bogie delantero: 20.28m.
- Posición longitudinal del juego de ruedas delantero del bogie delantero: 21.56m.
- Posición longitudinal del juego de ruedas trasero del bogie delantero: 19m.

Joint Properties: \$\$_bogie_trasero.\$J_bogie

Name: \$_bogie_trasero.\$J_bogie

Description:

From Marker: \$_bogie_trasero.\$M_Isys

To Marker: \$_bogie_trasero.\$M_bogie_BRF

Type: 7: General Rail Track Joint

States | Parameters

	Description	Pos.	Vel.	Dep.
1	s : Longitudinal position	1.28	0	independent
2	y : Lateral position	0	0	independent
3	z : Vertical position	0	0	independent
4	phi: Roll angle	0	0	independent
5	psi: Yaw angle	0	0	independent
6	gam: Pitch angle	0	0	independent

Joint Properties: \$\$_bogie_trasero.\$S_WSF.\$J_Wheelset

Name: \$_bogie_trasero.\$S_WSF.\$J_Wheelset

Description:

From Marker: \$_bogie_trasero.\$S_WSF.\$M_Isys

To Marker: \$_bogie_trasero.\$S_WSF.\$M_Wheelset_BRF

Type: 7: General Rail Track Joint

States | Parameters

	Description	Pos.	Vel.	Dep.
1	s : Longitudinal position	2.56	0	independent
2	y : Lateral position	0	0	independent
3	z : Vertical position	-0.46	0	independent
4	phi: Roll angle	0	0	independent
5	psi: Yaw angle	0	0	independent
6	gam: Pitch angle	0	0	independent

Figura 3.14 a y 3.14 b Colocación bogie trasero

A continuación, se cambia el nombre al elemento “\$B_Body” por “\$B_wagon” y se introducen todas sus propiedades de masa y momentos de inercia como se puede observar en la figura 3.15. Es importante que los momentos de inercia sean respecto del centro de gravedad.

Body Properties: \$B_wagon

Name:

Description:

Type:

Mass Properties

Data input:

Mass:

Center of Gravity

Position: x y z

Relative to:

Inertia

	x	y	z
Moments of inertia:			
x	<input type="text" value="56800"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
y	<input type="text" value="sym"/>	<input type="text" value="19700000"/>	<input type="text" value="0"/>
z	<input type="text" value="sym"/>	<input type="text" value="sym"/>	<input type="text" value="19700000"/>

Relative to:

Figura 3.15. Propiedades "\$B_wagon"

Después, en la primitiva del “\$B_wagon” se cambia el tipo a “21: Wheel Rail Cab” y se introducen todos los valores para su modelización que se presentan en las figuras 3.16 y 3.17.

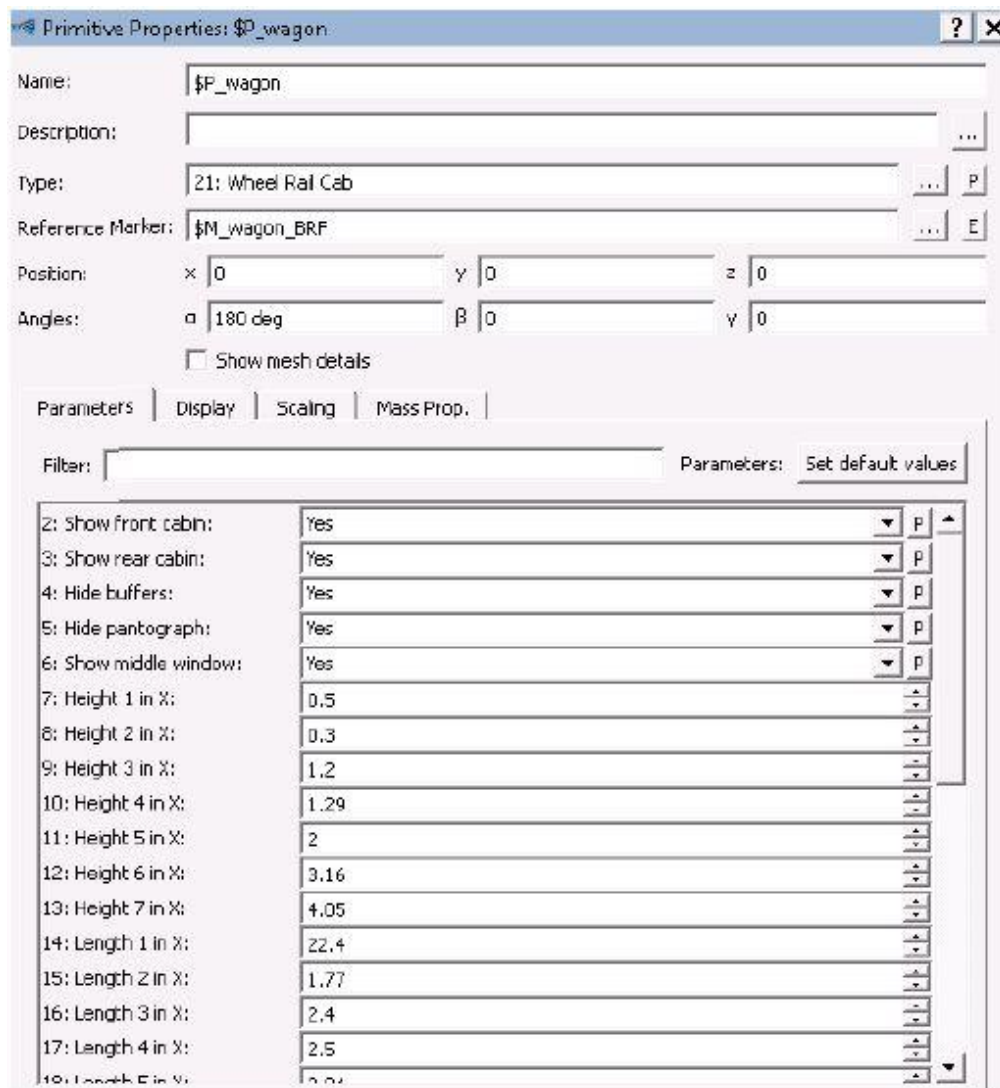


Figura 3.16. Valores "\$B_wagon"

17: Length 4 in X:	2.5
18: Length 5 in X:	2.04
19: Length 6 in X:	0.75
20: Length 7 in X:	0.3
21: Width 1 in X:	2.79
22: Width 2 in X:	3.02
23: Width 3 in X:	3.02
24: Width 4 in X:	2.83
25: Width 5 in X:	1.79
26: Width 6 in X:	1.45
27: Width 7 in X:	0.3
28: Layer Length L8 in X:	26.6
29: Layer Length L9 in X:	19
30: Layer Length L10 in X:	3.8
31: Pantograph X position:	0
32: Window distance rear:	0.36
33: Window distance front:	0.4
34: Window distance bottom:	0.66

Figura 3.17. Valores "\$B_wagon"

Continuando con el modelado, se cambiará el "display" de la primitiva para poner los colores que se quieran a la caja del vehículo, como muestra la figura 3.18.

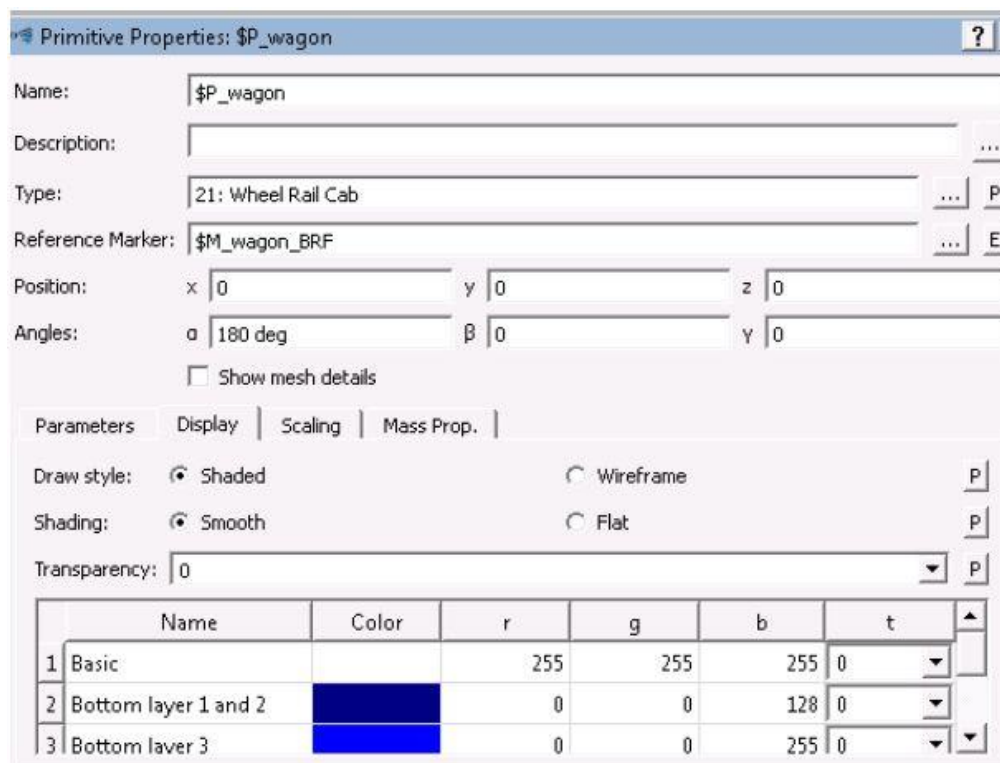


Figura 3.18. Display de la primitiva

Después, se cambia la posición longitudinal del wagon para colocarlo en la posición adecuada, como se observa en la figura 3.19.

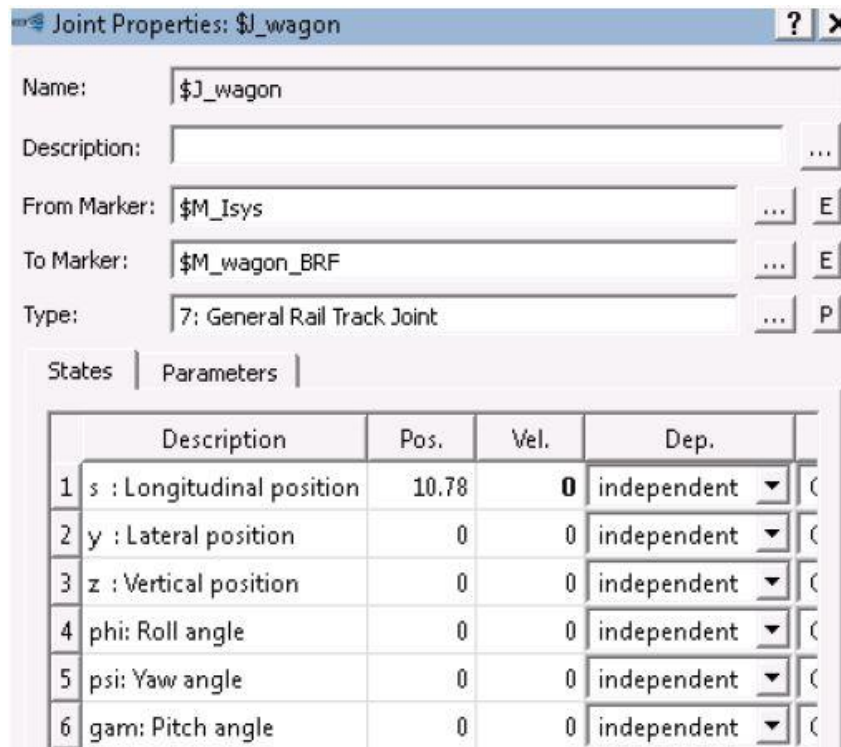


Figura 3.19. Cambio de posición del "wagon"

Por último, para unir el "wagon" a los bogies se deben crear dos marcadores del tipo "Identity Matrix" que se observan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Marcadores para unir el "wagon" a los bogies

Marcador	Posición (m)
Bogie_delantero	(9.5,0,0)
Bogie_trasero	(-9.5,0,0)

Para concluir, se guarda el modelo que ha quedado como se muestra en la figura 3.20.

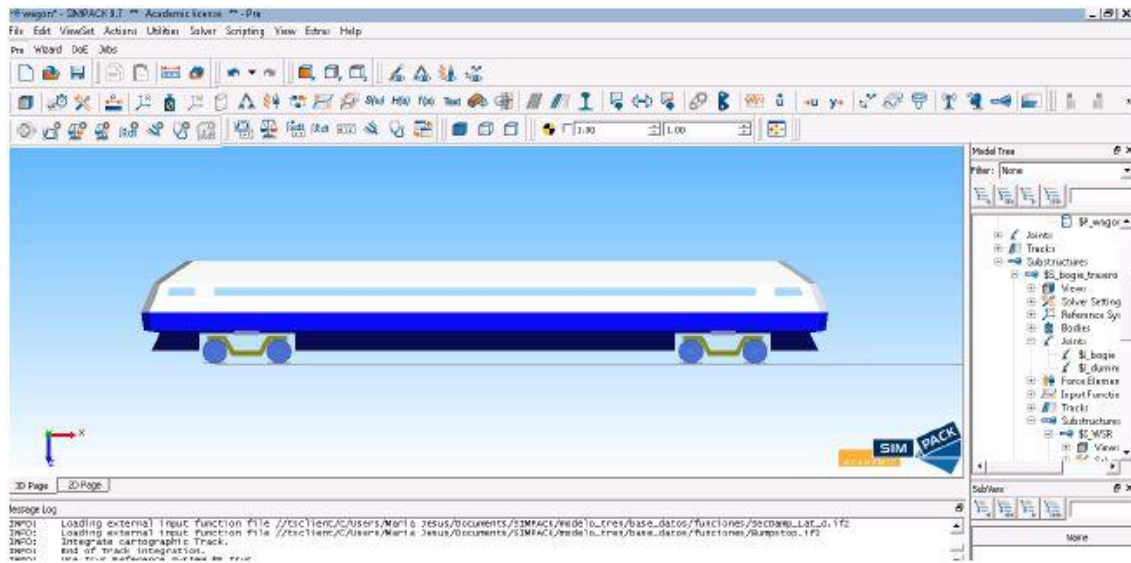


Figura 3.20. Vehículo ferroviario final

CAPÍTULO 4. CONTROL BORROSO

4.1. Introducción

En 1965, el profesor de teoría de sistemas de la Universidad de California (Berkeley), Lotfi A. Zadeh publicó su famoso artículo *“Fuzzy Sets, Information and Control”*. En este trabajo, presentó a la comunidad científica internacional la idea de conjunto borroso, o lo que se conoce como lógica borrosa. Desde entonces, el término lógica borrosa, o *fuzzy logic*, ha sido empleado desde dos puntos de vista diferentes: por un lado, la forma estricta del término hace referencia a un sistema lógico que generaliza la lógica digital clásica para admitir el razonamiento impreciso o bajo incertidumbre; por otro lado, en un sentido más amplio, la lógica borrosa engloba todas las teorías y tecnologías que emplean conjuntos borrosos. En cualquier caso, la lógica borrosa ha conseguido, en menos de un siglo, revolucionar la tecnología e impulsar la inteligencia artificial mediante la conjunción de los fundamentos matemáticos, la lógica y el razonamiento. Según Zadeh: *“La lógica borrosa trata de copiar la forma en que los humanos toman decisiones. Lo curioso es que, aunque baraja información imprecisa esta lógica es en cierto modo muy precisa: se puede aparcar un coche en muy poco espacio sin darle al de atrás. Suena a paradoja pero es así”* [8] [11].

4.2. Lógica borrosa

Tomando como base la imprecisión del razonamiento humano, pero bajo el planteamiento matemático, la lógica borrosa es capaz de generar la respuesta a una situación basándose en el conocimiento adquirido sobre ésta, que puede ser inexacto e incompleto. Por ejemplo, mediante la lógica clásica se puede definir un conjunto de personas altas, pero esto obliga a establecer una frontera clara que separe este subconjunto del resto de elementos, como una altura de 1.80 m. Este razonamiento clásico dejaría fuera del conjunto de personas altas a las personas de 1.79 m de estatura. Es evidente que este razonamiento tan estricto de la lógica clásica choca frontalmente con el razonamiento humano, mucho más vago e impreciso.

La lógica borrosa permite establecer límites suaves para los conjuntos, haciendo que no todo tenga que ser blanco o negro, sino que es posible la existencia de niveles de grises. Siguiendo con el ejemplo, pero desde el punto de vista borroso, se podría decir que una persona que mida 1.90 m está claro que es alta, o la calidad de pertenencia al conjunto de personas altas es 1. Una que mida 1.50 m está claro que no lo es, es decir, tiene un grado de pertenencia 0 al conjunto. Con las alturas intermedias se podría decir que la calidad de su pertenencia al conjunto variaría entre 0 y 1, siendo mayor el grado de pertenencia cuanto más alta sea la persona a clasificar, por ejemplo 0.25 para personas de 1.60 m y 0.75 para las de 1.80 m. Así una persona de 1.79 m no estaría excluida dentro del conjunto de personas altas, aunque la calidad de su pertenencia al conjunto sería menor que la de otra persona de mayor estatura [8].

4.3. Interacción entre Simpack y Simulink

A continuación, se explica la manera de comunicar Simpack y Simulink para que se obtengan los resultados de forma correcta. Los pasos que se deben llevar a cabo son los siguientes [3]:

- Generar un modelo en Simulink.
- Generar un archivo DLL del modelo.
- Introducir el archivo DLL en la base de datos del modelo en Simpack.
- Crear un sensor para usarlo de entrada en el modelo de Simulink.
- Crear un controlador para obtener la salida del modelo de Simulink.
- Generar expresiones en Simpack.
- Generar fuerzas en Simpack.
- Generar irregularidades de la vía.

4.3.1. Generación de un modelo en Simulink

En primer lugar, se debe realizar un modelo en Simulink, como el que se muestra en la figura 4.1, donde se introduce el controlador borroso generado en Matlab. De forma general, los modelos constaran de una o varias entradas dependiendo de las variables que se quieran introducir, un bloque que represente el controlador borroso (“Fuzzy Logic Controller”) y una salida que en este caso representa los valores de la fuerza que se genera en los amortiguadores del vehículo ferroviario [9].

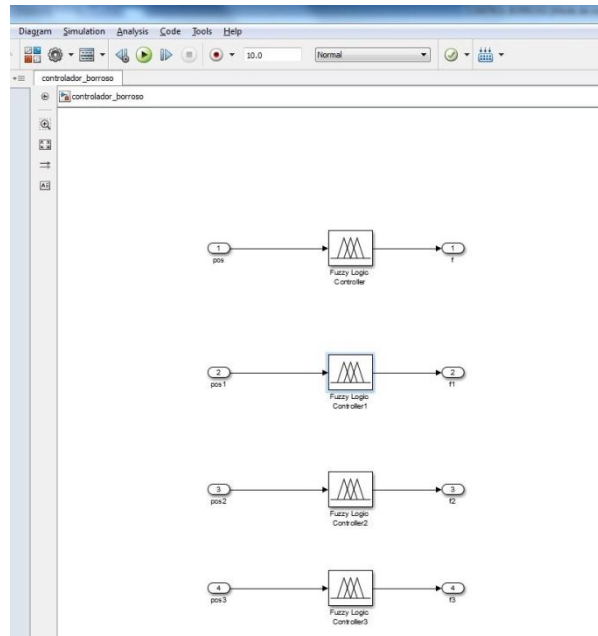


Figura 4.1. Modelo en Simulink

Por otro lado se debe construir el controlador borroso. Para su construcción se utiliza la ayuda de Matlab, escribiendo en la pantalla principal “fuzzy” se abre una pantalla, como muestra la figura 4.2, donde se puede configurar el controlador.

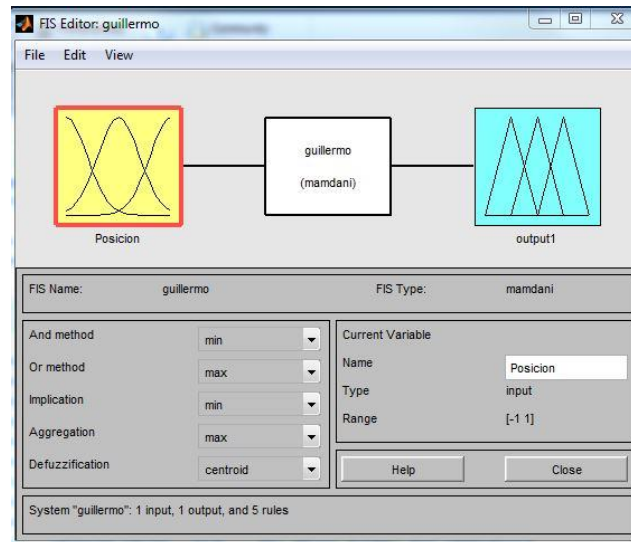


Figura 4.2. Controlador Borroso

Primero, se debe introducir el número de entradas y salidas de las que consta el controlador. Cada entrada y cada salida se debe configurar correctamente el rango en el que se van a mover los valores de cada variable para que los resultados se ajusten lo máximo posible.

Para continuar con la configuración del controlador, se le deben imponer unas reglas. Las reglas son del tipo: “si *premisa*, entonces *consecuencia*”. La premisa se relaciona con las variables de entrada, y la consecuencia con la variable de salida. La notación en las reglas no es relevante para el proceso de control, no afecta a la solución, y por ello se utiliza una notación que sea cómoda para el diseñador y representativa del proceso. En lógica borrosa las entradas y salidas se denominan variables lingüísticas, y a partir de ellas se construyen las reglas. Las reglas suelen representar todas las combinaciones posibles entre las variables de entrada y salida, de manera que la totalidad de las situaciones que se puedan dar en un sistema, queden representadas. Concretamente, las reglas consisten en una combinación de los conjuntos borrosos de cada variable [10].

Las variables lingüísticas más comunes que se usan en la construcción del controlador son:

- Muy negativo.
- Negativo.
- Cero.
- Positivo.
- Muy positivo.

Después de crear las variables lingüísticas y de establecer las reglas, el controlador está listo para trabajar y llevar a cabo su función introduciéndolo en el modelo que se ha realizado en Simulink. La manera de introducirlo en el

modelo en Simulink es la siguiente: se guarda el archivo, se exporta al “Workspace” (File -> Export -> To Workspace...) y se elige que el bloque incluido en el modelo de Simulink se rija por el controlador creado.

4.3.2. Generar un archivo DLL del modelo

El siguiente paso, es generar el archivo DLL para que Simpack lo pueda leer. Para hacer esto, en Simulink, se pulsa en el menú “Simulation – Configuration Parameters”.

Se siguen las instrucciones del manual proporcionado por Simpack [6] para elegir el “solver” adecuado, el “system target file” correcto, etc. Y se pulsa en “Build”, como se muestra en la figura 4.3.

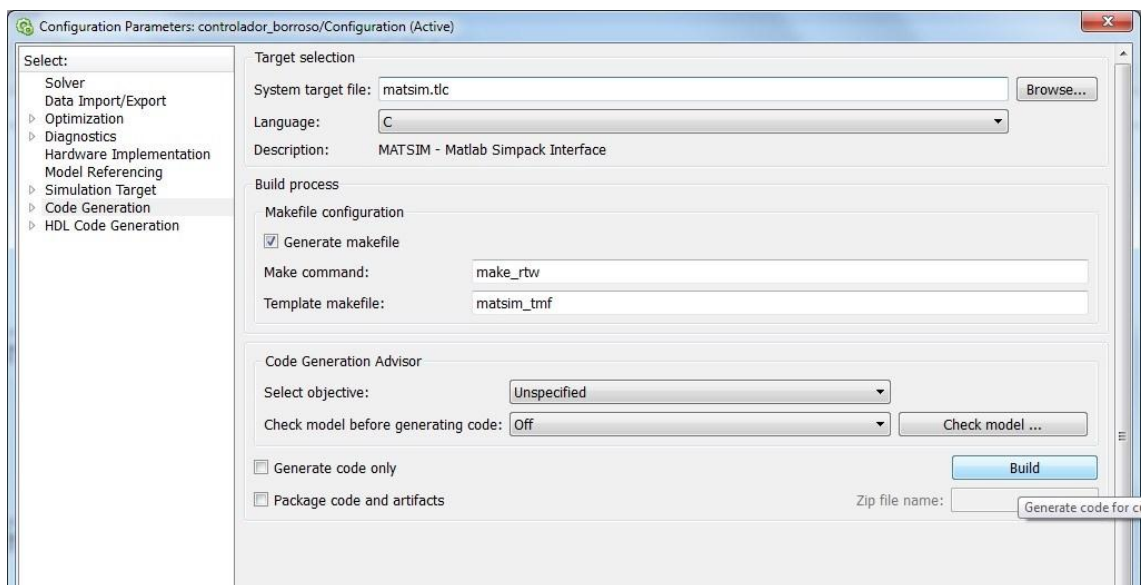


Figura 4.3. Pantalla generación de un archivo DLL

4.3.3. Introducir el archivo DLL en la base de datos del modelo en Simpack

Después de haber generado el archivo DLL, se copia en la carpeta “mbs_db_matsim” para que se pueda utilizar en Simpack, como se puede observar en la figura 4.4.

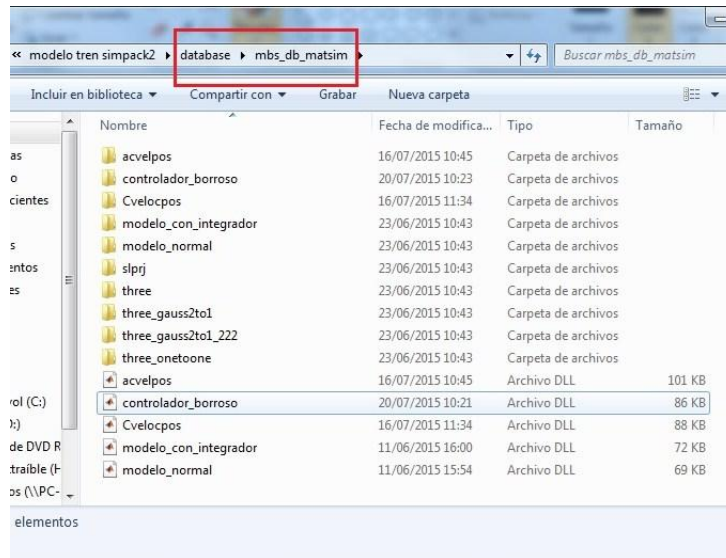


Figura 4.4. Carpeta donde se pegan los archivos DLL del modelo

4.3.4. Crear un sensor para usarlo de entrada en el modelo de Simulink

Para crear un sensor en Simpack se pulsa botón derecho en la pantalla principal, después se pulsa en “Create...” y por último pulsamos en “Control element...”.

A continuación, como se observa en la figura 4.5, se debe elegir el tipo de sensor que se quiere utilizar. En este Proyecto se utiliza el sensor “167: Accelerometer” que es con el que mejores resultados se han obtenido. Por último, se coloca el sensor donde se esté interesado en hacer mediciones. En este Proyecto los sensores están colocados en los cuatro amortiguadores secundarios de la suspensión del vehículo ferroviario.

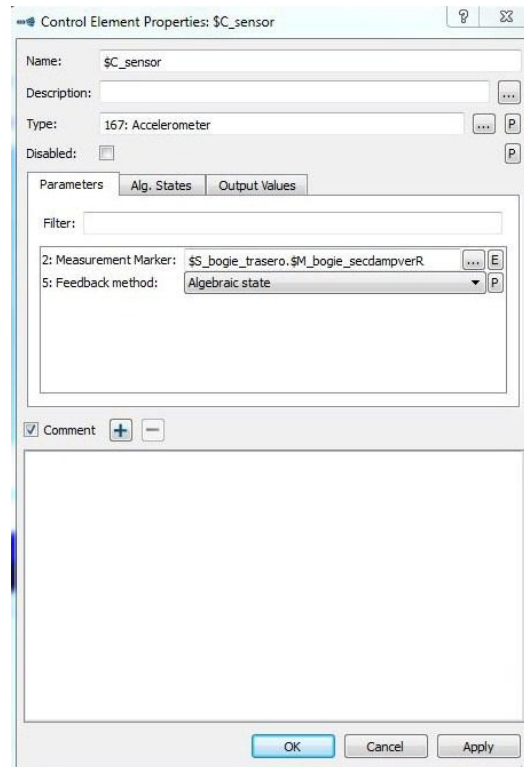


Figura 4.5. Pantalla de configuración de un sensor

4.3.5. Crear un controlador para obtener la salida del modelo de Simulink

Para crear un controlador, se siguen los mismos pasos del apartado 3.3.4. La diferencia que existe es que se debe cambiar el tipo, en este caso “233: MatSim” para poder utilizar los controladores que se han construido en Simulink. En la figura 4.6, se muestra como se crea un controlador. En la figura 4.7 se observan los sensores y el controlador creados para este sistema.

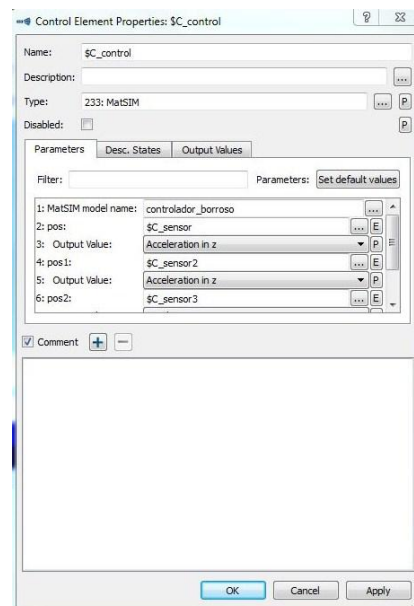


Figura 4.6. Pantalla configuración de un controlador

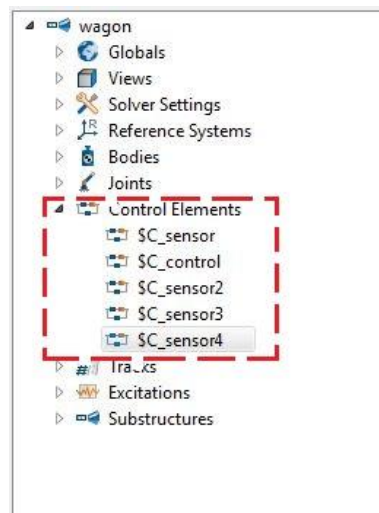


Figura 4.7. Controladores y sensores creados para el modelo

4.3.6. Generar expresiones en Simpack

Para generar las expresiones en Simpack, se pulsa botón derecho sobre la pantalla principal de Simpack, después se pulsa “Create...” y se pulsa en “Expressions”.

Para configurar las expresiones se escribe `FORCEOV($C_nombre del controlador, número de salida)` como se muestra en la figura 4.8.

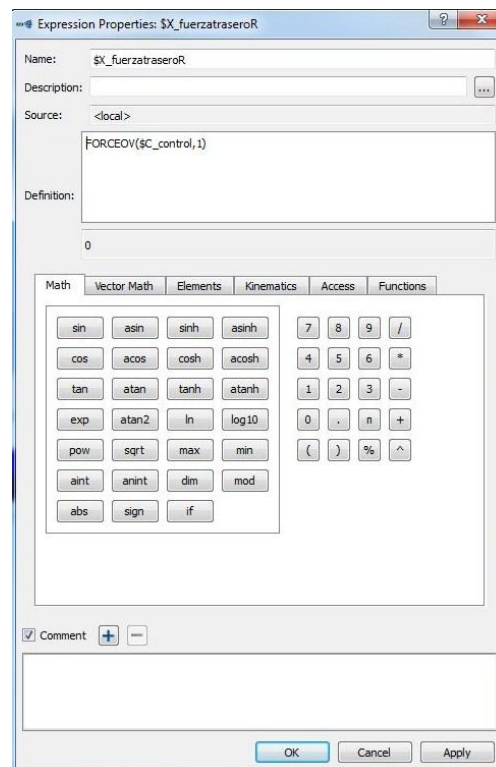


Figura 4.8. Pantalla configuración de expresiones

4.3.7. Generar fuerzas en Simpack

Con las fuerzas generadas en el controlador borroso, se crea un “Force Element” por cada sensor que se haya puesto en el vehículo ferroviario y se elige que sea del tipo “51: Force Expression” para poder introducir la expresión anteriormente creada, como se muestra en la figura 4.9.

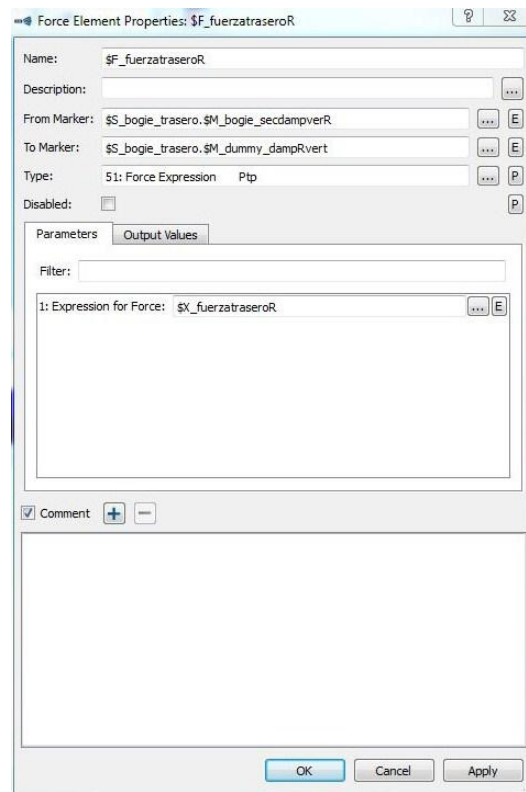


Figura 4.9. Pantalla configuración de fuerzas

4.3.8. Irregularidades de la vía

Para realizar las simulaciones que se muestran en el capítulo 5, se deben poner unas irregularidades en la vía por la que circula el vehículo ferroviario. La razón por la que se ponen irregularidades es para que la suspensión del vehículo entre en funcionamiento y se pueda ver su funcionamiento, ya que si no hay ninguna irregularidad la suspensión permanece en equilibrio sin tener que intervenir.

Para introducir las irregularidades en Simpack primero se crea una excitación. En Simpack se pulsa botón derecho en la pantalla principal, se pincha en “Create...”, a continuación se pulsa en “Excitation...” y se crea la excitación que se quiera. En este caso se va a crear una excitación tipo senoidal con los valores que se muestran en la figura 4.10.

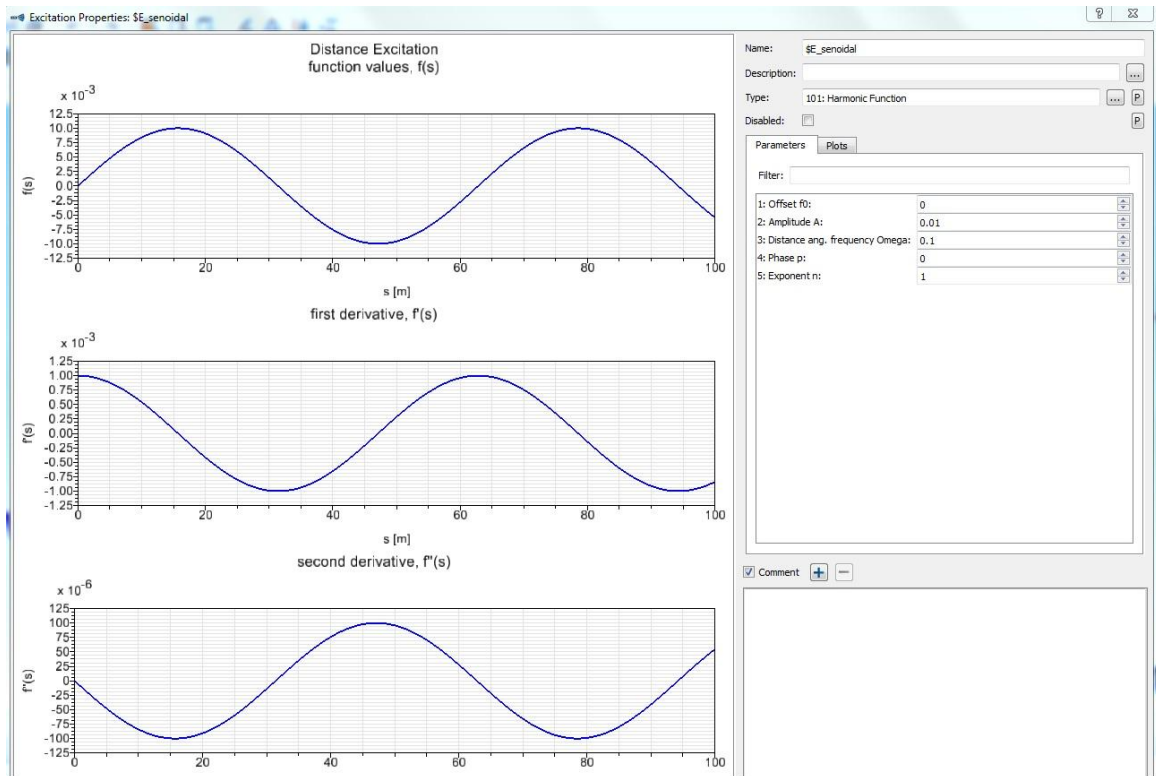


Figura 4.10. Excitación del vehículo ferroviario

A continuación, se introduce la excitación en la vía, para hacer esto se pulsa en “Tracks” y a continuación se pincha en la pestaña “Excitation” donde se introduce la excitación creada anteriormente. En este caso, interesa que la excitación sea en vertical, por lo tanto, se introduce la excitación en las opciones verticales como se muestra en la figura 4.11. Por último se pone el comienzo y el fin de la excitación, valores que también se muestran en la figura 4.11.

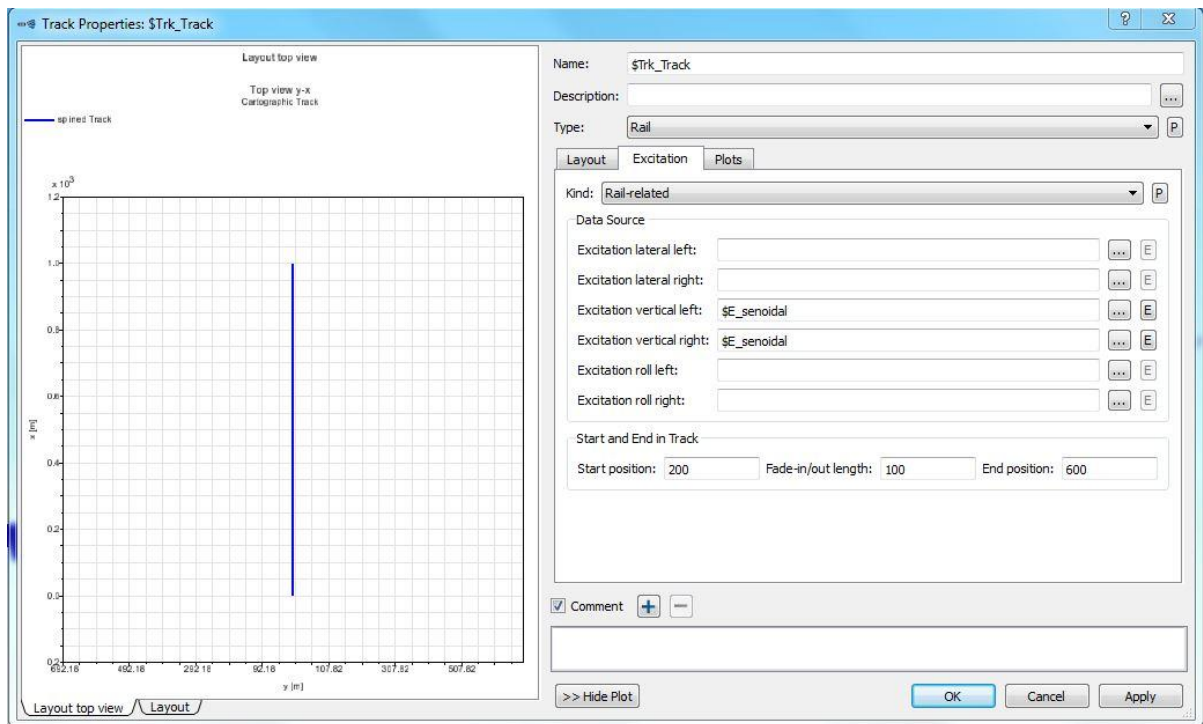


Figura 4.11. Irregularidad en la vía

CAPÍTULO 5.

Simulaciones

En este capítulo se muestran las simulaciones realizadas durante el Trabajo. Se realizan dos simulaciones con dos controladores distintos para ver las diferencias que existen entre las dos simulaciones y con qué controlador se obtienen mejores resultados.

5.1. Controlador 1

El primer tipo de controlador borroso que se utiliza para las simulaciones realizadas es un controlador con una entrada y una salida. Se realizan cuatro iguales para cada uno de los amortiguadores de la suspensión secundaria del vehículo ferroviario.

Para realizar el modelo en Simulink, como se puede observar en la figura 5.1, se introduce una entrada que representa la posición del amortiguador y una salida que es común en todos los controladores y representa la fuerza que se va a generar en el amortiguador.

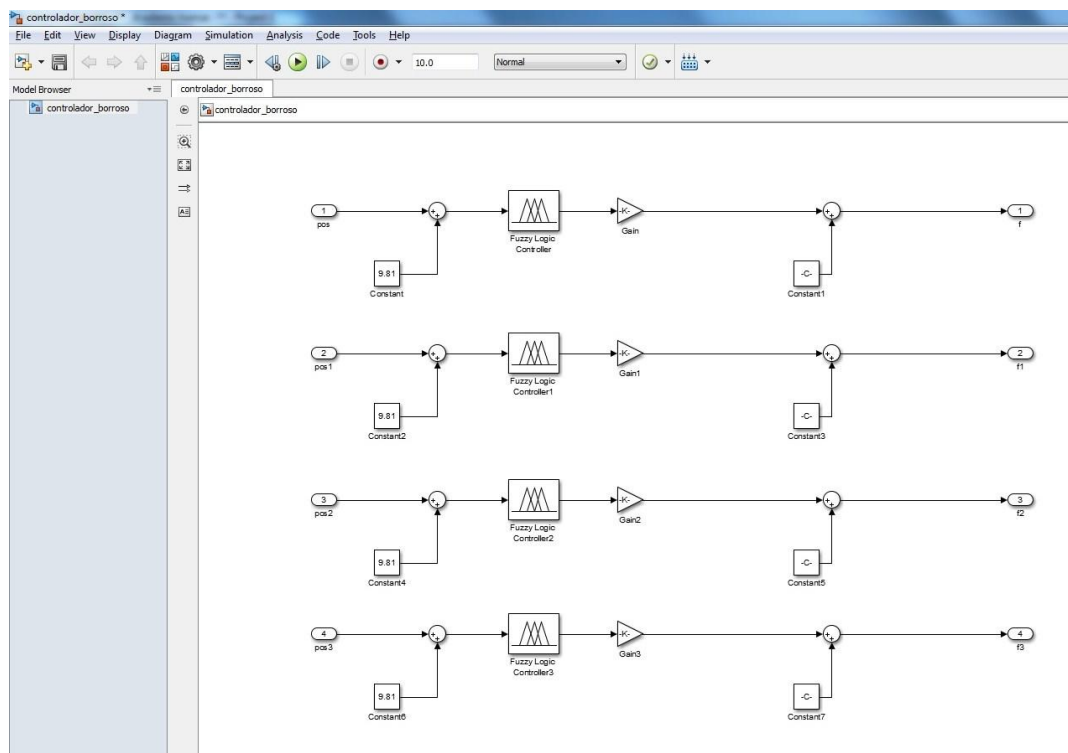


Figura 5.1. Modelo controlador 1 en Simulink

Por otro lado, para la configuración del controlador borroso, lo primero que se hace es fijar un rango tanto para la variable de entrada y otro para la variable de salida. En este controlador, el rango de ambas variables es el mismo $[-1 \ 1]$.

A continuación, se colocan correctamente las variables lingüísticas en los rangos correctos. Después, se realizan las reglas que, en este caso, al tener solamente una entrada y una salida, son reglas directas. Esto se muestra en la tabla 5.1, sin combinación entre ellas.

Tabla 5.1. Reglas controlador borroso 1

Regla	Posición	Fuerza
1	Muy Negativo	Negativo
2	Negativo	Negativo
3	Cero	Cero
4	Positivo	Positivo
5	Muy Positivo	Positivo

Para finalizar, con todos los parámetros introducidos y configurado el controlador se siguen los pasos del apartado 4.3, para poder realizar las simulaciones necesarias.

5.1.1. Resultados

- Fuerza.

La comparativa de resultados de la fuerza ejercida en los amortiguadores traseros y delanteros de la suspensión secundaria se muestra en la figuras 5.2 y 5.3. En este caso, sólo se han comparado los del lado izquierdo ya que los resultados del lado derecho son exactamente iguales tanto en el bogie trasero como en el bogie delantero.

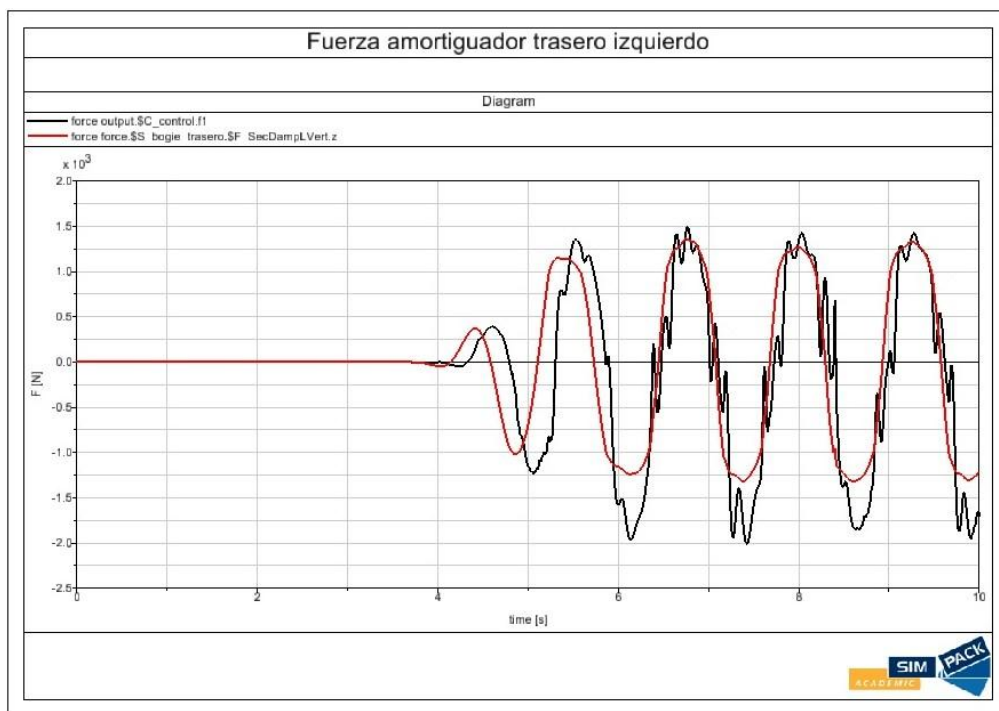


Figura 5.2. Comparación de la fuerza vertical ejercida por el amortiguador trasero izquierdo con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 1

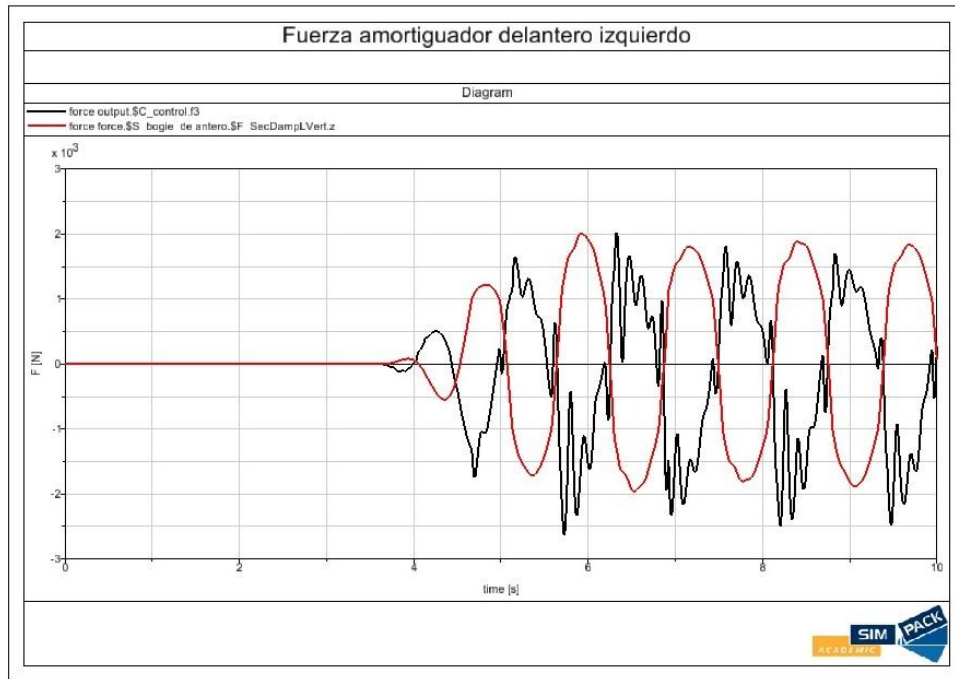


Figura 5.3. Comparación de la fuerza vertical ejercida por el amortiguador delantero izquierdo con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 1

- Aceleración.

A continuación, se muestra la comparativa de resultados obtenidos de la aceleración vertical que se produce en la suspensión secundaria del vehículo ferroviario con una suspensión pasiva y con una suspensión activa que se ha diseñado con el controlador 1. En las figuras 5.4 y 5.5 se muestran los resultados de aceleración que se obtienen con el controlador 1.

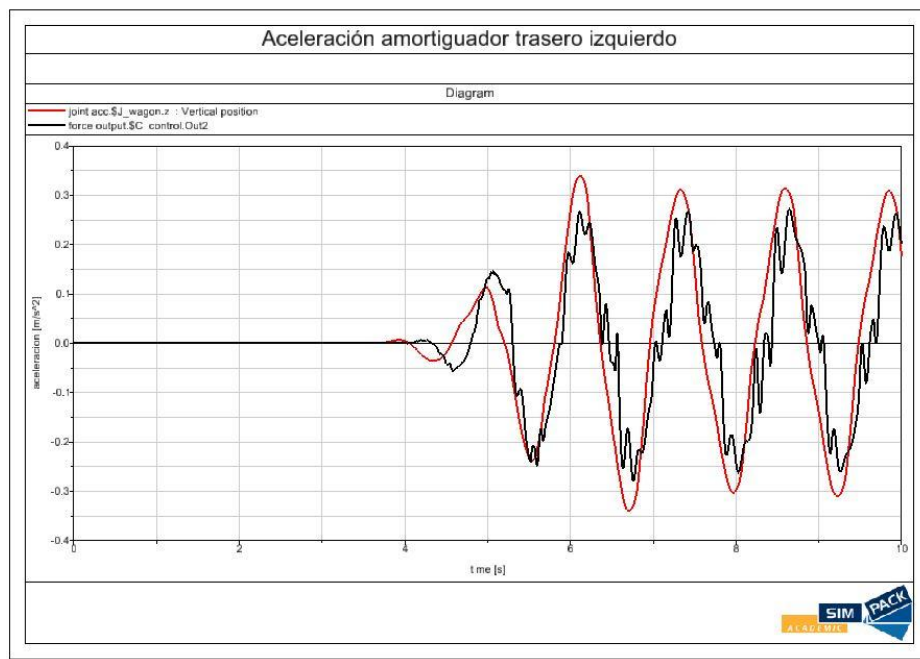


Figura 5.4. Comparación de la aceleración vertical ejercida por el amortiguador trasero izquierdo con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 1

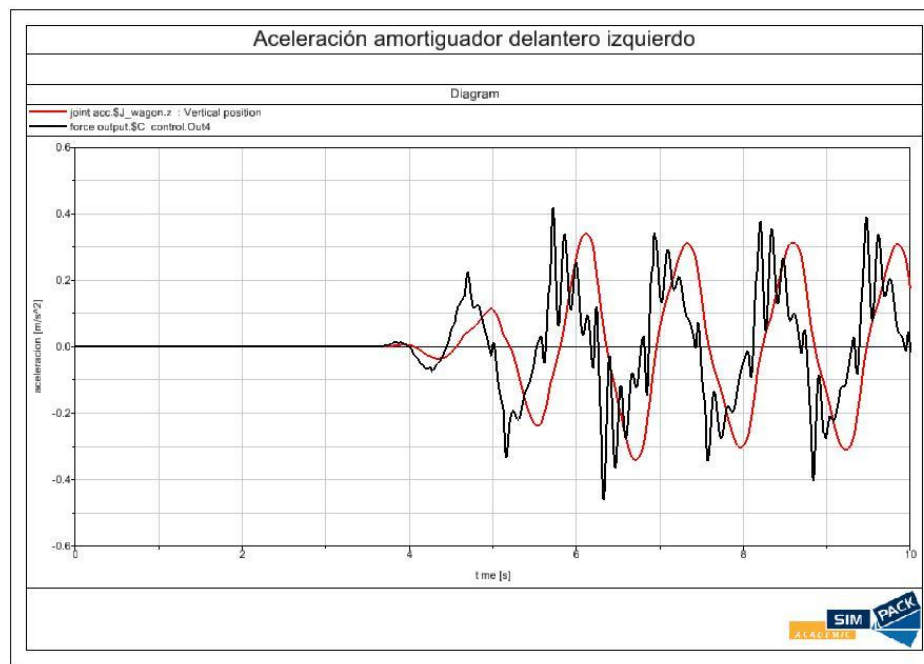


Figura 5.5. Comparación de la aceleración vertical ejercida por el amortiguador delantero izquierdo con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 1

5.2. Controlador 2

El segundo tipo de controlador borroso que se ha utilizado para las simulaciones realizadas es un controlador con dos entradas y una salida. Se han realizado cuatro iguales para cada uno de los amortiguadores de la suspensión secundaria del vehículo ferroviario.

Para realizar el modelo en Simulink, como se puede observar en la figura 5.6, se introducen dos entradas que representan la posición y velocidad del amortiguador y una salida que representa la fuerza ejercida en los amortiguadores. Las constantes y ganancias que aparecen en el modelo han servido para calibrar el modelo correctamente.

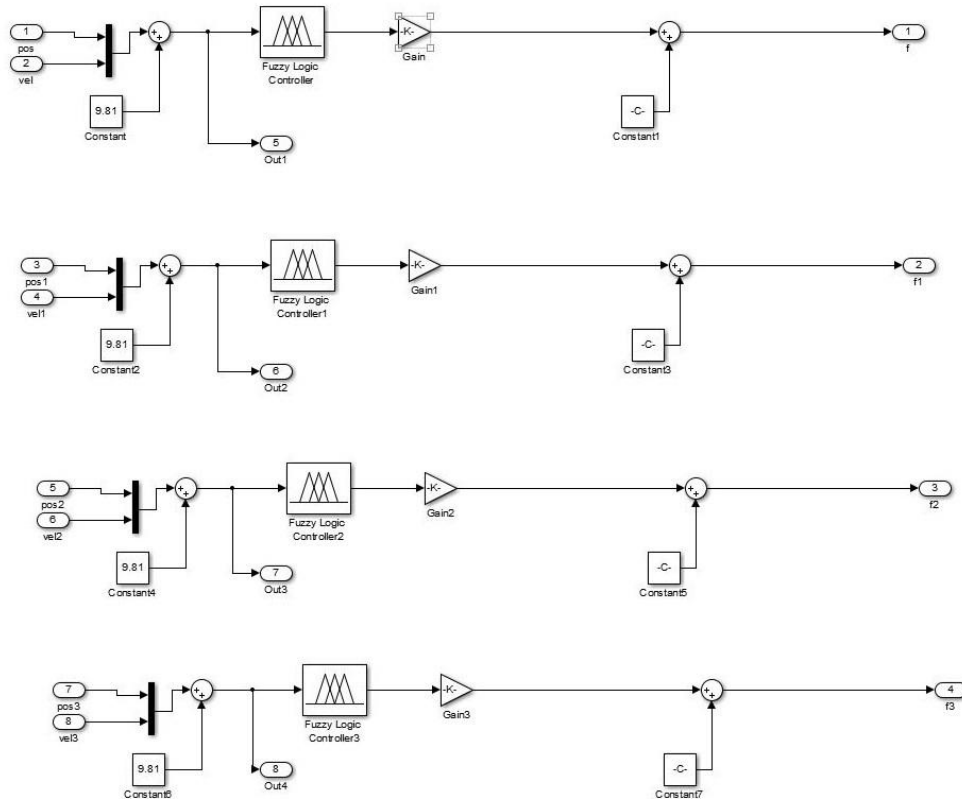


Figura 5.6. Modelo de controlador 2 en Simulink

Para la configuración del controlador borroso, lo primero que se hace es fijar un rango tanto para las variables de entrada como para la variable de salida. En este controlador, al igual que en el controlador 1, el rango de ambas variables es el mismo $[-1 \ 1]$.

A continuación, se colocan correctamente las variables lingüísticas en los rangos correctos como muestra la figura 5.7. Después, se realizan las reglas que en este caso se hace una tabla de verdad (tabla 5.2) para conseguir todas las posibilidades posibles entre las variables lingüísticas.

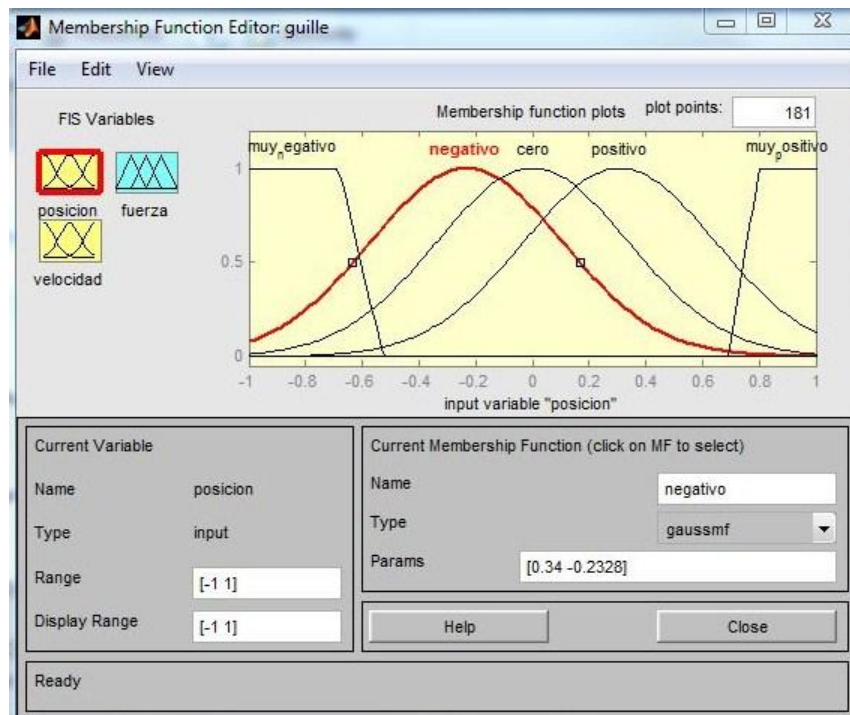


Figura 5.7. Colocación de las variables lingüísticas del controlador 2

Tabla 5.2. Reglas controlador borroso 2

Regla	Posición	Velocidad	Fuerza
1	Muy Negativo	Muy Negativo	Muy Positivo
2	Muy Negativo	Negativo	Muy Positivo
3	Muy Negativo	Cero	Positivo
4	Muy Negativo	Positivo	Positivo
5	Muy Negativo	Muy Positivo	Positivo
6	Negativo	Muy Negativo	Muy Positivo
7	Negativo	Negativo	Muy Positivo
8	Negativo	Cero	Positivo
9	Negativo	Positivo	Cero
10	Negativo	Muy Positivo	Negativo
11	Cero	Muy Negativo	Positivo
12	Cero	Negativo	Positivo
13	Cero	Cero	Cero
14	Cero	Positivo	Negativo
15	Cero	Muy Positivo	Negativo
16	Positivo	Muy Negativo	Positivo
17	Positivo	Negativo	Positivo
18	Positivo	Cero	Negativo
19	Positivo	Positivo	Muy Negativo
20	Positivo	Muy Positivo	Muy Negativo
21	Muy Positivo	Muy Negativo	Positivo
22	Muy Positivo	Negativo	Positivo
23	Muy Positivo	Cero	Positivo
24	Muy Positivo	Positivo	Negativo
25	Muy Positivo	Muy Positivo	Muy Positivo

5.2.1 Resultados

- Fuerza.

La comparativa de resultados de la fuerza ejercida en los amortiguadores traseros y delanteros de la suspensión secundaria se muestra en la figuras 5.8 y 5.9. En este caso, solo se ha comparado los del lado derecho ya que los resultados del lado izquierdo son exactamente iguales tanto en el bogie trasero como en el bogie delantero.

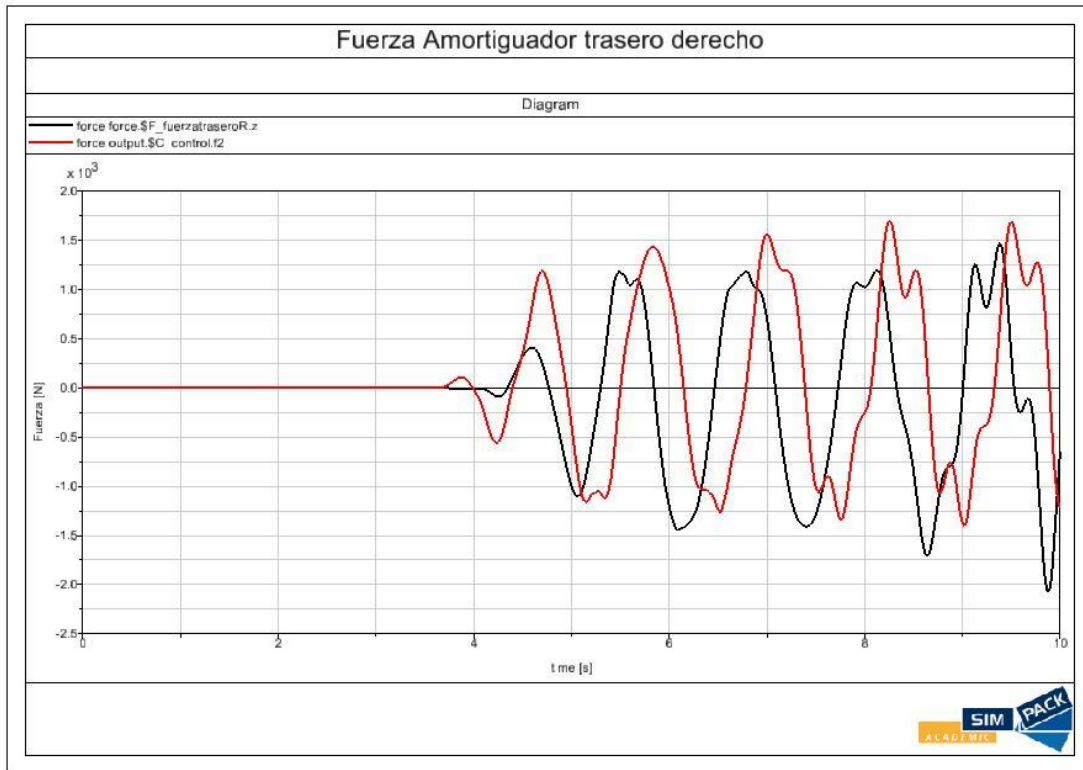


Figura 5.8. Comparación de la fuerza vertical ejercida por el amortiguador trasero derecho con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 2

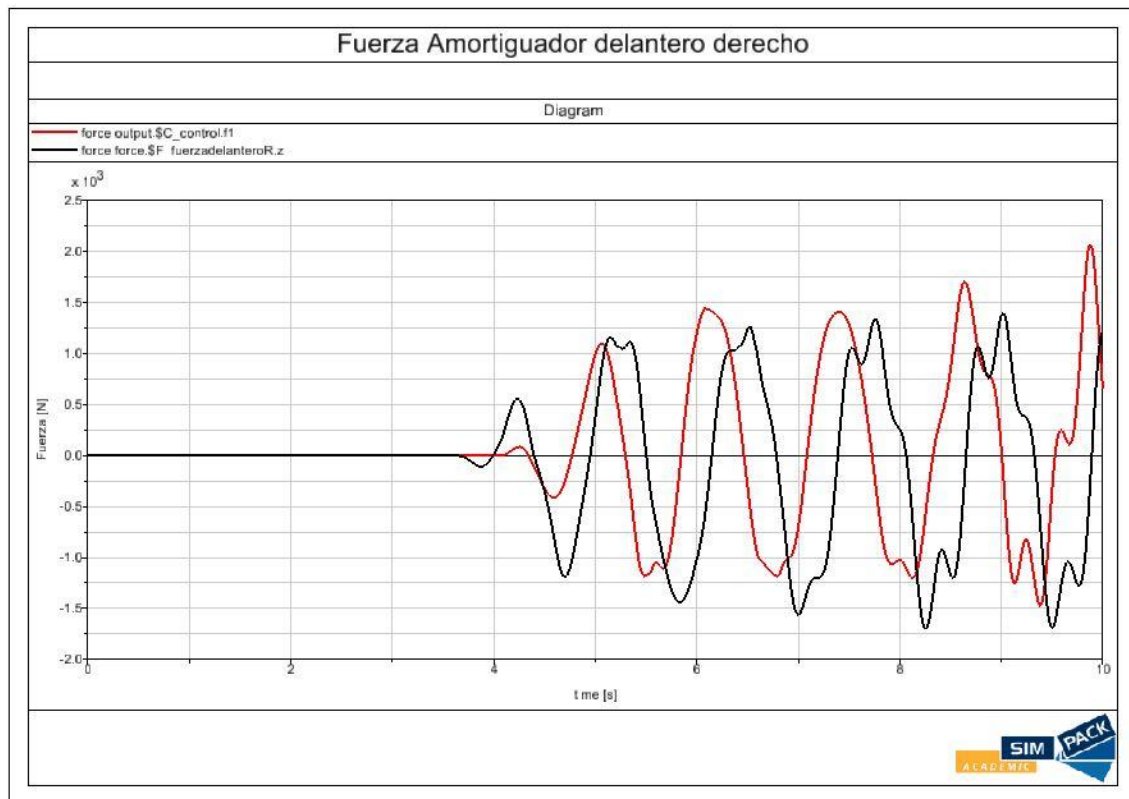


Figura 5.9. Comparación de la fuerza vertical ejercida por el amortiguador delantero izquierdo con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el Controlador 2.

- Aceleración.

De la misma manera que con el controlador 1, a continuación, se muestra la comparativa de resultados obtenidos de la aceleración vertical que se produce en la suspensión secundaria del vehículo ferroviario con una suspensión pasiva y con una suspensión activa que en este caso se ha diseñado con el controlador 2.

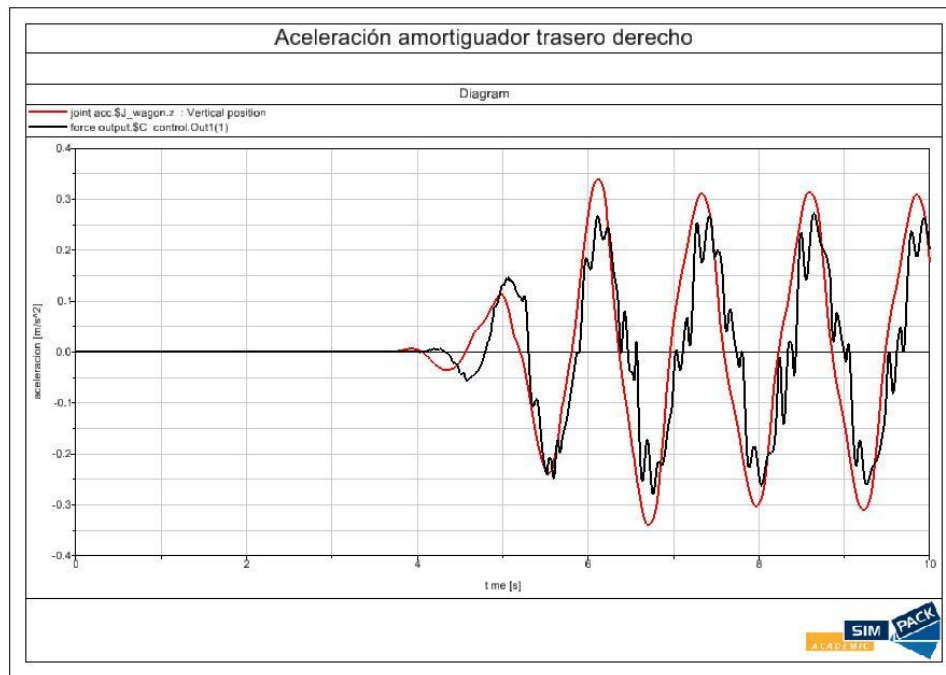


Figura 5.10. Comparación de la aceleración vertical ejercida por el amortiguador trasero derecho con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 2

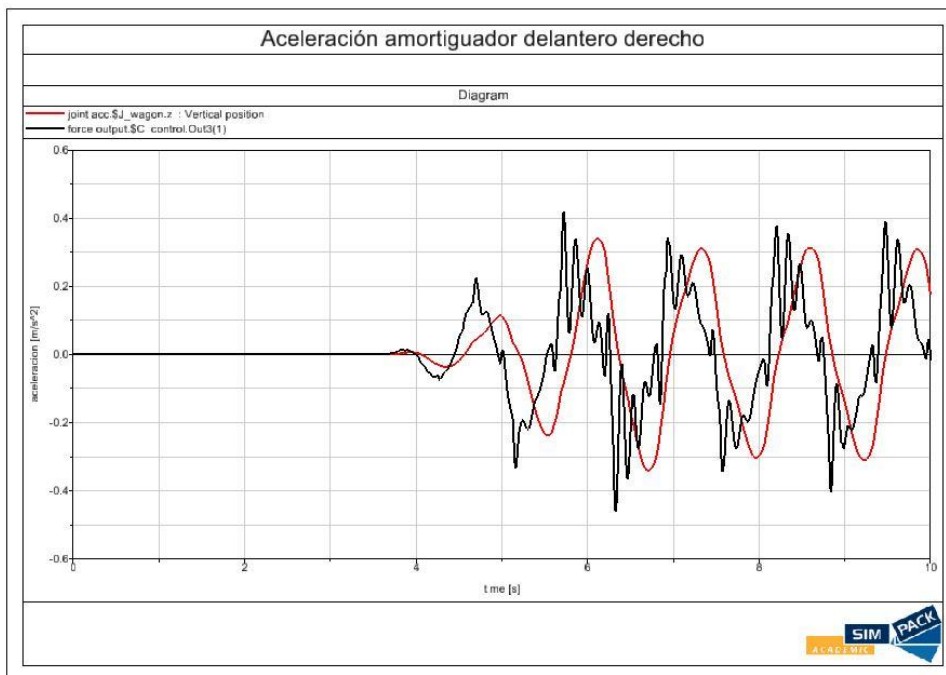


Figura 5.11. Comparación de la aceleración vertical ejercida por el amortiguador delantero derecho con suspensión pasiva (rojo) y con suspensión activa (negro) utilizando el controlador 2

CAPÍTULO 6.

Conclusiones y trabajos futuros.

En este capítulo se muestran las conclusiones que se han obtenido a partir de las simulaciones realizadas y los posibles trabajos futuros de este Trabajo Fin de Grado.

6.1. Conclusiones

Las conclusiones que se han obtenido después de realizar el Trabajo Fin de Grado son las siguientes.

- Después de realizar el modelo de vehículo ferroviario en Simpack, se puede decir que este modelo se asemeja en gran medida a un vehículo ferroviario real y, por tanto, las pruebas que se realicen en tienen un gran parecido con las pruebas que se puedan realizar en un vehículo ferroviario real.

- En cuanto a las simulaciones realizadas, con los dos tipos de controladores que se han utilizado, se ha conseguido mejorar los resultados que se obtienen en una suspensión secundaria con una suspensión activa que con una suspensión pasiva. Se consigue disminuir la fuerza y la aceleración vertical con una suspensión activa. Por tanto, se puede decir que la investigación y el desarrollo en suspensiones de este tipo es recomendable ya que se puede aumentar la velocidad de los vehículos ferroviarios, lo que hace aumentar su competitividad entre los diversos medios de transporte. Por otro lado, los resultados de este tipo de suspensiones pueden ser mejores, por tanto se debe investigar la lógica borrosa más a fondo, para obtener otro método de configuración de los controladores que no sea sólo la experiencia de la persona encargada de configurarlos, para conseguir resultados óptimos y ajustados a la realidad.
- Las suspensiones activas, como se puede observar en los resultados, ofrecen mejores prestaciones que las suspensiones pasivas, por tanto, esto hace que su coste se incremente. Por tanto, se deben desarrollar estas suspensiones pero se deben mirar las variables que determinan la competitividad de este medio de transporte como puede ser el precio del billete por pasajero y el tiempo del trayecto, es decir, la velocidad del vehículo. Con estos datos, se puede hacer un estudio de mercado para ver hasta qué punto este tipo de suspensiones son rentables y beneficiosas.

6.2. Trabajos futuros

A continuación, se exponen los trabajos que se podrían realizar a partir de este Trabajo Fin de Grado.

- En este Trabajo Fin de Grado solamente se han desarrollado dos tipos de controladores borrosos. Se podrían realizar otros tipos de controladores borrosos aumentando el número de entradas o se pueden cambiar las reglas de dichos controladores para ver si los resultados mejoran.
- Ya que la lógica borrosa no da toda la precisión que se requiere, se propone utilizar controladores de mayor precisión como pueden ser un controlador LQG, que era el objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado, pero que por motivos técnicos dicho controlador, finalmente, no se pudo utilizar.
- Se han estudiado las suspensiones secundarias verticales de un vehículo ferroviario. Para completar el estudio de la suspensión

secundaria de un vehículo ferroviario, se propone realizar el estudio de la suspensión secundaria lateral colocando controladores en esta suspensión, para conseguir un estudio completo de esta suspensión.

- Por último, se propone como trabajo futuro mejorar la conexión entre diferentes programas. En este caso mejorar la sincronización entre Simulink y Simpack para mejorar la realización de simulaciones y así obtener resultados más precisos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dirección General de Energía y Transportes, Comisión Europea-*Un ferrocarril moderno para una Europa moderna.*
- [2] Apuntes asignatura “Ferrocarriles y vehículos automóviles” Ingeniería en Tecnologías Industriales- Universidad Carlos III de Madrid.
- [3] **Oliva Domínguez, Rubén** Proyecto fin de máster. *Desarrollo de un controlador borroso para la mejora del comportamiento vertical de un vehículo ferroviario* .Universidad Carlos III de Madrid.
- [4] **Varios autores.** *Trenes: Material Rodante del transporte ferroviario.*
- [5] **Jorge Hurel Ezeta, Anthony Mandow, Alfonso García Cerezo** (2013). *Los Sistema de suspensión Activa y Semiactiva: Una Revisión.*
- [6] Simpack Documentation. (2014) Simpack Release 9.7 Manual general.
- [7] Introducción a Simpack. Creación de un vehículo ferroviario. Universidad Carlos III de Madrid.
- [8] **Isabel Delgado Díaz y Mercedes Lobatón Orta.** *Modelo de control borroso para la regulación de la temperatura del agua en piscinas climatizada.* Proyecto fin de carrera. Universidad de Huelva.
- [9] Matlab Documentation, Simulink. www.mathworks.com/help/simulink/. Consultado en: Julio de 2015
- [10] **Rodriguez Maria, Jorge** Proyecto fin de carrera. *Desarrollo de una suspensión activa en un vehículo ferroviario usando lógica borrosa.* Universidad Carlos III de Madrid.
- [11] **Lofty Asker Zadeh** (1965). *Fuzzy Sets, Information and Control.*
- [12] *603 km/h: Japan's maglev train breaks new world speed record* <http://phys.org/news/2015-04-kmh-japan-maglev-notches-world.html> Consultado en: Septiembre de 2015